

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

# Известия

Юго-Западного  
государственного  
университета

Научный журнал

Том 28 № 1 / 2024

# Proceedings

of the Southwest  
State University

Scientific Journal

Vol. 28 № 1 / 2024



**Известия Юго-Западного  
государственного университета  
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием  
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Информатика, вычислительная техника и управление: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:**

**Емельянов Сергей Геннадьевич**, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:**

**Бобырь Максим Владимирович**, д-р техн. наук, профессор;  
Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Агеев Евгений Викторович**, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Борзов Дмитрий Борисович**, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Бредихин Владимир Викторович**, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия);

**Бульчев Всеволод Валериевич**, д-р техн. наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал (г. Калуга, Россия);

**Бхатгачарья Сиддхартха**, д-р философии (PhD), профессор, Университет Христа (Крайст), Бангалор, Индия;

**Бьянко Лино**, д-р философии (PhD), профессор, Университет архитектуры, строительства и геодезии (Мальта);

**Димитров Любомир Ванков**, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

**Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич**, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Колчунов Виталий Иванович**, д-р техн.наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Кузнецов Сергей Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

**Кукарас Даниэль**, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

**Куц Вадим Васильевич**, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Мещеряков Роман Валерьевич**, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва, Россия);

**Овчинников Виктор Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

**Пановко Григорий Яковлевич**, д-р техн. наук, профессор, Институт машиноведения Российской академии наук (г.Москва, Россия);

**Петрешин Дмитрий Иванович**, д-р техн. наук, профессор, Брянский государственный технический университет (г. Брянск, Россия);

**Сизов Александр Семенович**, д-р техн. наук, профессор, НИЦ ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ (г.Курск, Россия);

**Смирнов Игорь Михайлович**, д-р техн. наук, доцент, АО «Научно-исследовательский инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

**Сотникова Ольга Анатольевна**, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

**Титов Виталий Семенович**, д-р техн.наук, профессор, заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Турков Андрей Викторович**, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);

**Щербаков Владимир Иванович**, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

**Яцун Сергей Федорович**, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия).

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Емельянов Сергей Геннадьевич (председатель)**, д-р техн.наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

**Бертрам Торстен**, д-р техн. наук, профессор, Институт теории управления и системного проектирования Технического университета (г. Дортмунд, Германия);

**Грабовой Кирилл Петрович**, д-р экон. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

**Гриднев Сергей Юрьевич**, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);

**Добрица Вячеслав Порфирьевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Ежов Владимир Сергеевич**, д-р техн. наук, профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Ивахненко Александр Геннадьевич**, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Колмыков Валерий Иванович**, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Колчунов Владимир Иванович**, д-р техн.наук, профессор, член Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Корневский Николай Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

**Латыпов Рашит Абдулхакович**, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г.Москва, Россия);

**Локтионова Оксана Геннадьевна**, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия).

### Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

**Телефон:** +7(4712) 22-25-26,

**Факс:** +7(4712) 50-48-00.

**E-mail:** rio\_kursk@mail.ru

**Наименование органа, зарегистрировавшего издание:**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

**Сайт журнала:** <https://science.swsu.ru>

© Юго-Западный государственный университет, 2024



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

### Типография:

Полиграфический центр Юго-Западного государственного университета, 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

**Подписка и распространение:**

журнал распространяется по подписке.

Подписной индекс журнала 41219 в объединенном каталоге «Пресса России».

**Периодичность:** четыре выпуска в год

### Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 27.03.2024.

Дата выхода в свет 05.04.2024. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 20,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 9.

16+

# Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU .

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

Mechanical engineering and machine science: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Computer science, computer engineering and control: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

## EDITOR-IN-CHIEF

**Sergei G. Emelianov**, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

**Maksim V. Bobyr**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

## EDITORIAL BOARD

**Yevgenii V. Ageev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Dmitry B. Borzov**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Vladimir V. Bredikhin**, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Vsevolod V. Bulychev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Kaluga, Russia);

**Bhatgacharya Siddhartha**, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Christ University (Christ), Bangalore, India;

**Lino Bianco**, Dr. of Sci. (Philosophy), Professor of IAA, Visiting Professor at University of Architecture, Civil Eng. and Geodesy (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

**Lyubomir V. Dimitrov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

**Zhanybaj T. Zhusubaliyev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Vitalii I. Kolchunov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Sergey N. Kuznetsov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

**Danijel Kukaras**, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

**Vadim V. Kuts**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Roman V. Meshcheryakov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

**Viktor V. Ovchinnikov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

**Grigorii Ya. Panovko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

**Dmitry I. Petreshin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Bryansk State Technical University (Bryansk, Russia);

**Alexander S. Sizov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Igor M. Smirnov**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, JSC "Research engineering Institute» (Balashikha, Russia);

**Olga A. Sotnikova**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

**Vitalii S. Titov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Andrey V. Turkov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

**Vladimir I. Shcherbakov**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

**Sergey F. Yatsun**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

## EDITORIAL COUNCIL

**Sergei G. Emelianov**, Chairman, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

**Torsten Bertram**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Institute of Control Theory and System Design, Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

**Kirill P. Grabovoy**, Dr. of Sci. (Economics), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

**Sergey Yu. Gridnev**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

**Vyacheslav P. Dobritsa**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Vladimir S. Ezhov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Alexander G. Ivakhnenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Valerii I. Kolmykov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Vladimir I. Kolchunov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences Advisor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Nikolay A. Korenevskii**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

**Rashit A. Latypov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

**Oksana G. Loktionova**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia).

### Founder and Publisher:

“Southwest State University”

### Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

**Phone:** +7 (4712) 22-25-26,

**Fax:** +7 (4712) 50-48-00.

**E-mail:** rio\_kursk@mail.ru

### The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication, Information Technology and Mass media (ПИ №ФЦ77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

**Web-site:** <https://science.swsu.ru>

### Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,  
50 Let Oktyabrya str. 94,  
Kursk 305040, Russian Federation

### Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.  
Subscription index 41219  
in the General Catalogue “Pressa Rossii”

**Publication frequency:** quarterly

### Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2024



Publications are available in accordance with the Creative Commons Attribution 4.0 License

Singed to print 27.03.2024.

Release date 05.04.2024. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 20,9.

Circulation 1000 copies. Order 9.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

**Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения посредством эвристических алгоритмов ..... 8**

*Фетисов А.С., Литовченко М.Г., Шутин Д.В.*

**Оптимизация процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде ..... 27**

*Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Сабельников Б.Н., А. Е. Агеева*

### СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

**Среднегодовые температуры воды в тепловых сетях криолитозоны ..... 44**

*Китаев Д.Н., Бохан А.Р.*

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

**Амплитудно-частотное смещение, влияющее на точность измерений лага скорости ..... 57**

*Евсюков П.С., Андреева О.Н.*

**Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления ..... 71**

*Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А.*

**Ассоциативное поле как модель ментальной репрезентации: когнитивный, эмотивный и языковой аспекты ..... 88**

*Степыкин Н.И.*

**О программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базированных систем.... 100**

*Карамышева Н.С., Милованов А.С., Митрохин М.А., Зинкин С.А.*

**Методика формирования требований к характеристикам информационного обеспечения систем управления беспилотных авиационных транспортных систем ..... 123**

*Мамченко М.В.*

**Когнитивный подход к разработке расписаний занятий на основе модификации генетического алгоритма ..... 148**

*Лисицин Л. А., Лисицин А.Л., Лисицин А. Л.*

**Визуальное программирование метода отношения площадей ..... 163**

*Бобырь М.В., Храпова Н.И.*

**К сведению авторов ..... 180**

## CONTENT

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

**Multi-Objective Optimization of Active Hybrid Fluid Film Bearings Using Heuristic Algorithms.....8**

*Fetisov A. S., Litovchenko M. G., Shutin D. V.*

**Optimization of the Process of Obtaining Powder Materials for the Production of Carbide Cutting Tools by Electrodipersion of Tn20 Alloy Metal Waste in Water .....27**

*Ageeva E. V., N Horyakova. M., Sabelnikov B. N., Ageeva A. E.*

### CONSTRUCTION

Original articles

**Average Annual Water Temperatures in Heating Networks Cryolithozones .....44**

*Kitaev D. N., Bohan A. R.*

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

**Amplitude-Frequency Shift Affecting the Accuracy of Velocity Lag Measurements.....57**

*Evsyukov P. S., Andreeva O. N.*

**Research of the Method For Measuring Temperature with a Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer .....71**

*Bondar O. G., E Brezhnev. O., Botikov K. A.*

**Associative Field as a Model of Mental Representation: Cognitive, Emotive and Linguistic Aspects .....88**

*Stepykin N. I.*

**On the Software Implementation of Cognitive Interoperable Agent-Based Systems..... 100**

*Karamysheva N. S., Milovanov A. S., Mitrokhin M. A., Zinkin S. A.*

**Method of Forming the Requirements to Information Support Characteristics of Control Systems of Unmanned Aircraft Transport Systems ..... 123**

*Mamchenko M. V.*

**The Use of Artificial Intelligence In Applied Tasks of the Modern Information Society ..... 148**

*Lisitsin L. A., Lisitsin A. L., Lisitsin A. L.*

**Visual Programming of the Area Ratio Method ..... 163**

*Bobyry M. V., Khrapova N. I.*

**Information of the authors ..... 180**

### Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения посредством эвристических алгоритмов

А.С. Фетисов <sup>1</sup> ✉, М.Г. Литовченко <sup>1</sup>, Д.В. Шутин <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
ул. Наугорское шоссе 29, г. Орёл 302026, Российская Федерация

✉ e-mail: fetisov57rus@mail.ru

#### Резюме

**Цель исследования.** Проектирование подшипников скольжения, особенно для сложнагруженных роторных машин, является трудоемкой задачей. Внедрение в них систем управления параметрами движения ротора дополнительно повышает сложность такой процедуры. Исследование показывает разработанный подход к оптимальному проектированию активных опор роторов с использованием эвристических оптимизационных алгоритмов. Он позволяет получить сначала множество оптимальных по Парето решений, а затем определить единственную конфигурацию опорного узла, в наилучшей степени отвечающей заданным критериям.

**Методы.** Задача оптимального параметрического синтеза активной опоры жидкостного трения решалась с использованием ее численной модели, сопряженной с моделью движения ротора в опоре. Для поставленной задачи проектирования были сформулированы целевые функции, определены проектные переменные, и наложены необходимые ограничения. С использованием многокритериальных версий генетического алгоритма и алгоритма роя частиц проведены процедуры оптимального синтеза опорных узлов. Полученные различными методами решения сопоставлены и проанализированы на основании результатов модельных тестов.

**Результаты.** В ходе исследования был разработан алгоритмический и программный инструментарий решения задач оптимального параметрического синтеза активных гибридных опор жидкостного трения. Примененные целевые функции являются конфликтующими, поэтому первичным результатом решения является трехмерный фронт Парето. Протестированные эвристические алгоритмы показали качественно схожие решения, однако генетический алгоритм охватывает больший их диапазон. Конечные решения в целом удовлетворяют предъявляемым критериям, однако способы принятия конечных решений требуют дополнительной проработки.

**Заключение.** Исследование представляет подход к автоматизированному проектированию опор скольжения, который позволяет одновременно учитывать трибологические, динамические аспекты поведения роторно-опорной системы, а также обеспечивать готовность к использованию систем управления в опорных узлах. Протестированные эвристические алгоритмы дают сопоставимые решения оптимизационной задачи за также сопоставимое время. Дальнейшее совершенствование методики параметрического синтеза таких опор целесообразно проводить в направлениях алгоритмов принятия решений, уточнения целевых функций, а также ускорения применяемых расчетных моделей.

**Ключевые слова:** активные гибридные подшипники; параметрический синтез; многокритериальная оптимизация; роторные системы; генетический алгоритм; алгоритм роя частиц.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00789) «Методы синтеза и предиктивного анализа гидромеханических триботронных систем с использованием машинного обучения».

**Для цитирования:** Фетисов А.С., Литовченко М.Г., Шутин Д.В. Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения посредством эвристических алгоритмов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 8-26. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-8-26>.

Поступила в редакцию 03.11.2023

Подписана в печать 09.12.2023

Опубликована 27.03.2024

## Multi-Objective Optimization of Active Hybrid Fluid Film Bearings Using Heuristic Algorithms

Alexander S. Fetisov <sup>1</sup> ✉, Maksim G. Litovchenko <sup>1</sup>, Denis V. Shutin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orel State University named after I.S. Turgenev  
29 Naugorskoe highway, Orel 302026, Russian Federation

✉ e-mail: sov57rus@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The design of sliding bearings, especially for heavily loaded rotary machines, is a laborious task. The implementation of control systems for the movement parameters of the rotor further increases the complexity of a design procedure. The study shows a developed approach to the optimal design of active rotor bearings using heuristic optimization algorithms. The approach allows to obtain a set of optimal Pareto solutions and determine the only configuration of the reference node that best meets the given criteria.

**Methods.** The problem of optimal parametric synthesis of an active fluid friction bearing was solved using a numerical model coupled with the model of rotor movement in the support. For the given design problem, objective functions were formulated, design variables were determined, and the necessary restrictions were imposed. Using multicriteria versions of the genetic algorithm and the particle swarm algorithm, procedures for the optimal synthesis of reference nodes were carried out. The solutions obtained by different methods are compared and analyzed based on the results of model tests.

**Results.** As part of the study, algorithmic and software tools were developed for solving problems of optimal parametric synthesis of active hybrid fluid friction bearings. The applied objective functions are conflicting, so the primary result of the solution is a 3D Pareto front. The tested heuristic algorithms showed qualitatively similar solutions, but the genetic algorithm covers a larger range of them. On the whole, the final decisions meet the criteria, but the methods for making final decisions require additional elaboration.

**Conclusion.** The study presents an approach to the automated design of sliding bearings, which allows you to simultaneously take into account the tribological, dynamic aspects of the behavior of the rotary bearing system, as well as ensure readiness for the use of control systems in bearing nodes. The tested heuristic algorithms give comparable solutions to the optimization problem in comparable time as well. Further improvement of the method of

*parametric synthesis of such supports should be carried out in the direction of decision-making algorithms, refinement of objective functions, as well as acceleration of the applied calculation models.*

**Keywords:** active hybrid bearings; parametric synthesis; multiobjective optimization; rotor systems; genetic algorithm; particle swarm algorithm.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding.** The work was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00789) "Methods of synthesis and predictive analysis of hydromechanical tribotronic systems using machine learning".

**For citation:** Fetisov A. S., Litovchenko M. G., Shutin D. V. Multi-Objective Optimization of Active Hybrid Fluid Film Bearings Using Heuristic Algorithms. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 8-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-8-26>.

Received 03.11.2023

Accepted 09.12.2023

Published 27.03.2024

\*\*\*

## Введение

Применение упрощенных методик проектирования подшипников скольжения может быть оправдано в случаях, когда не требуется высокая точность в получении решений, требующая большого количества вычислительно дорогих расчетов [1-3]. В ряде случаев требуется получить более точные решения для высоконагруженных трибоузлов [4,5]. Для получения подобных решений используются нелинейные численные математические модели роторно-опорных систем, учитывающие различные физические эффекты кавитации, турбулентности, перекосы в роторной системе и т.д. [6,7]. Выделение на основе параметров математических моделей роторных систем целевых критериев, отражающих различные аспекты интегральных и динамических параметров роторной системы, а также характеристик системы управления, позволяет сформулировать задачу проектирования

роторно-опорных узлов в виде задачи поиска оптимального набора параметров роторной системы.

Параметры, отражающие аспекты динамического поведения роторных систем, практически не рассматриваются ни в упрощенных методиках проектирования, ни в качестве целевых функций при рассмотрении задачи поиска оптимальных решений для роторно-опорных систем. Особенно эти проблемы характерны для проектируемых роторно-опорных систем с гибким ротором, для которых вычислительная стоимость динамических расчетов значительно выше по сравнению с системами с жёстким ротором [8, 9]. Отчасти, ускорение расчетов может осуществляться методами симплификации роторных систем [10, 11]. В этом отношении можно отметить работу [12], где в качестве критерия оптимизации рассмотрен декремент затухания колебаний ротора при относительно простой аналитической модели подшипника скольжения.

Внедряемые системы управления подшипниками скольжения значительно усложняют процедуру их проектирования и добавляют дополнительные целевые критерии для задачи оптимизации, обеспечивающие наиболее эффективное преобразование управляющих сигналов в управляющие воздействия.

Ввиду общей сложности и нелинейности математических моделей роторно-опорных узлов применение математических алгоритмов оптимизации первого порядка или выше является маловероятным и применяется по большей части для упрощенных моделей. Наиболее часто встречаемыми алгоритмами являются эвристические алгоритмы. В работе [13] генетический алгоритм использован для оптимизации формы опорной поверхности газодинамического подшипника скольжения. Для уменьшения размерности задачи авторы разбили оптимизируемую область на подрегионы, что позволило ускорить процесс решения. В работе [14] рассмотрена задача многокритериальной оптимизации роторного теплообенника. Авторами был использован недоминантный сортирующий генетический алгоритм (NSGA-2) для получения энергоэффективных и дешевых конструктивных решений. Другим известным алгоритмом нулевого порядка, применяемым в задачах роторной динамики, является алгоритм роя частиц. В работе [15] авторами показаны преимущества данного модифицированного алгоритма для решения задач с высокой вычислительной стоимостью. Также су-

ществует множество слабо применяемых эвристических алгоритмов: алгоритм бабочки [16], алгоритм колонии муравьев [17], алгоритм светлячка [18] и т.д.

Отмеченные особенности и трудности задачи оптимального проектирования роторно-опорных узлов позволяют констатировать актуальность разработки новых подходов, которые позволили бы учитывать весь комплекс важных целевых критериев в задаче параметрического синтеза активных опор жидкостного трения. Предлагаемый в данной работе подход позволяет учесть динамическое поведение ротора в подшипниках скольжения, интегральные характеристики активных опор скольжения и характеристики управляемости роторной системой. Сопутствующей задачей, решаемой в данном исследовании, является сравнение результатов решения оптимизационной задачи при помощи различных алгоритмов: генетического алгоритма (Genetic Algorithm – GA) и алгоритма роя частиц (Multi-Objective Particle Swarm Optimization – MOPSO). Представленные решения задачи многокритериальной оптимизации позволяют находить сбалансированные сочетания представленных критериев. Анализ результатов также позволяет определить наиболее актуальные направления дальнейших исследований в данной области.

#### **Математическая модель роторно-опорной системы и постановка оптимизационной задачи**

В работе рассматривается задача оптимального проектирования роторно-опор-

ной системы на подшипниках скольжения с активной смазкой [19]. Используется модель жесткого ротора, работающего в докритических частотах и без значительных перекосов в опорах. Схема активно смазываемого подшипника представлена на рис. 1. Он представляет собой втулку с 4 каналами подачи смазки на центральной линии с прямоугольными гидростатиче-

скими карманами. В каждом канале давление смазочного материала регулируется отдельным сервоклапаном, создавая регулируемое силовое воздействие на ротор. Таким образом, несущая способность в данном гибридном подшипнике создается совокупностью гидродинамического и гидростатического эффектов, а регулирующая сила – только гидростатическим.

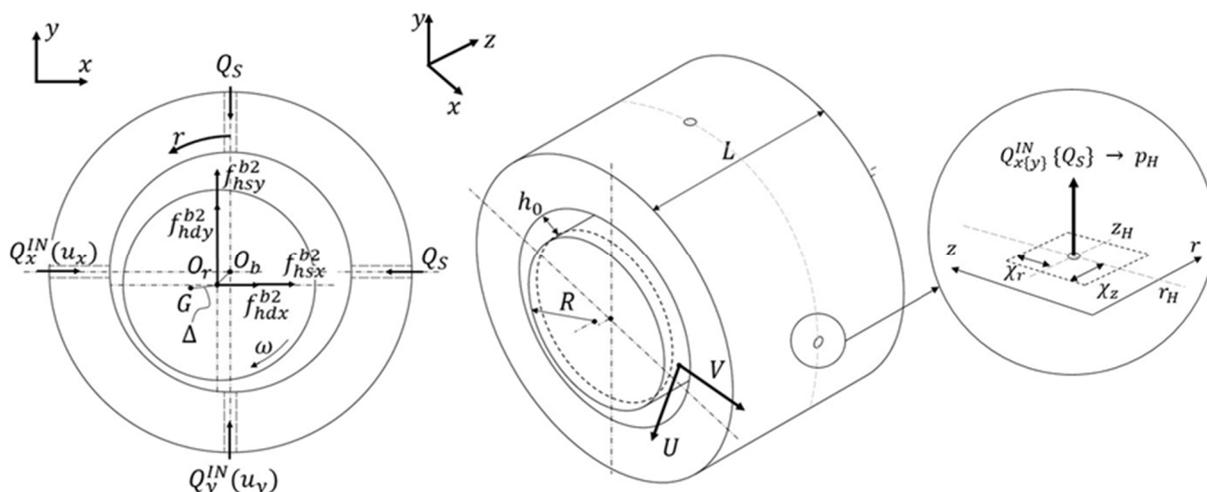


Рис. 1. Схема активного гибридного подшипника

Fig. 1. Scheme of an active hybrid bearing

Математическая модель гибридного подшипника базируется на основных положениях теории гидродинамической смазки [20, 21]. Модель использует численное решение модифицированного уравнения Рейнольдса методом конечных разностей [22, 23]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + 12V, \quad (1)$$

где  $x, z$  – Декартовы координаты;  $h$  – функция радиального зазора подшипника скольжения;  $\mu$  – динамическая вязкость смазочного материала;  $p$  – искомое дав-

ление смазочного материала в зазоре подшипника скольжения;  $U$  – скорость смазочного материала в окружном направлении;  $V$  – скорость смазочного материала в радиальном направлении.

Совместно с ним решаются уравнения баланса расходов смазочного материала [24] через питающие каналы с жиклерами. Решение гидродинамической задачи в виде рассчитанных реакций смазочного слоя служит основой для одномассовой модели жесткого ротора. Движение ротора в подшипнике под действием совокупности сил определяется решением уравнений Лагранжа, как в [19].

Система управления рассмотренного подшипника основана на П-регуляторе с обратной связью по положению ротора, более детальное ее описание показано в [25].

Решаемая задача параметрического синтеза подшипника традиционно сводится к минимизации целевой функции. В данном случае сразу три различных параметра рассматриваются в качестве таковых.

1. *Момент вязкого трения* в смазочном слое является одним из ключевых энергетических параметров, который описывает эффективность роторной системы. Он характеризует в том числе интенсивность теплообразования в зоне трения, и, как следствие, изменения реологических свойств смазочного материала. В процессе расчетов оценивалось среднее значение момента трения в установившемся режиме работы роторно-опорной системы.

$$M_{\text{тр}} = \frac{D}{2} \iint_S \left[ \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U\mu}{h} \right] dS, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр подшипника;  $S$  – площадь поверхности подшипника.

2. *Время переходного процесса* в ответ на внешнее импульсное силовое возмущение выбрано в качестве базового критерия для оценки устойчивости ротора в подшипнике. Для получения этого параметра для каждой конфигурации подшипника проводилась тест-симуляция. Ротор свободно переходил в точку равновесия в подшипнике, после чего к нему прикладывался импульс си-

лы величиной в 3 веса ротора и длительностью 0,2 мс. Далее переходный процесс по ортогональным разверткам колебаний оценивался методом скользящего окна. Установившийся размах колебаний менее 3% от радиального зазора подшипника считался критерием окончания переходного процесса.

$$T_{\text{пп}} = (i_{\text{старт}} - i_{\text{стоп}}) \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где  $i_{\text{старт}}$  и  $i_{\text{стоп}}$  – номер итерации начала и окончания переходного процесса;  $\Delta t$  – расчетный интервал времени.

3. *Максимальное управляющее воздействие*  $F_{\text{max}}$  является характеристикой, определяющей предел возможностей по управлению положением ротора в активно смазываемом подшипнике. Оно во многом зависит от конфигурации каналов подачи смазки, создающих гидростатическое воздействие на ротор. Для гидростатических подшипников эффект дросселирования может оказывать существенное влияние на реакцию смазочного слоя. Поэтому расчет проводился для централизованного положения ротора в подшипнике, что дает равные гидравлические сопротивления для всех питающих каналов. Максимальная сила воздействия вычислялась в случае, когда давление в двух рядом расположенных каналах питания при этом максимальное, а в двух противоположащих – минимальное.

Среди рассмотренных критериев, по меньшей мере, момент трения противоречит двум другим (рис. 2), поскольку последние требуют наибольшего зна-

чения стабилизирующих и/или управляющих сил, а критерием снижения трения является уменьшение перепадов в распределении давления. Таким образом решение оптимизационной задачи в данном случае будет представлять собой трехмерный фронт оптимальных по Парето решений. Ввиду того, что 2 остальных параметра стремятся к минимизации, а представленный параметр должен максимизироваться, для целостности общей задачи он выглядит следующим образом:

$$\xi = \frac{1}{F_{\max}}. \quad (4)$$

Сама оптимизационная задача в таком случае может быть формализована следующим образом:

$$\begin{aligned} & \min f(X) = \{M_{\text{тр}}, T_{\text{шт}}, \xi\} \\ & \text{при} \left\{ \begin{array}{l} 40 < L < 80 \\ 40 < h_0 < 80 \\ 0,5 < d_h < 4 \\ 5 < l_h < 12 \\ 5 < W_p < 60 \\ 5 < L_p < 40 \\ 200 < D_p < 1000 \end{array} \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $X = [L, h_0, d_h, l_h, W_p, L_p, D_p]$  м  
где  $L$  – длина подшипника, мм;  $h_0$  – радиальный зазор, мкм;  $d_h$  – диаметр канала подвода смазки, мм;  $l_h$  – длина канала подвода смазки, мм;  $W_p$  – ширина гидростатического кармана, % от ширины подшипника;  $L_p$  – длина кармана по окружности;  $D_p$  – глубина кармана, % от зазора подшипника  $h_0$ .

Ряд прочих параметров в ходе решения оптимизационной задачи оставался неизменным. Эти параметры характеризуют условия и режим работы проектируемого подшипника. В качестве смазочного материала использовалась вода с вязкостью 1,14 мПа·с и плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>. Частота вращения ротора массой 4,5 кг составляла 3000 об/мин. Рабочее давление подачи смазочного материала составляло 0,2 МПа, а максимальное давление подачи смазочного материала 1,0 МПа.

## Результаты и их обсуждение

Представленная оптимизационная задача решалась с использованием генетического алгоритма и алгоритма многокритериальной оптимизации роя частиц, реализованных на базе программного комплекса Matlab. Для генетического алгоритма размер популяции составлял 200 элементов, а количество итераций – 50. Абсолютная погрешность сходимости составила  $10^{-5}$ . При заданных границах переменных проектирования расчет был окончен при достижении поставленной погрешности на 30 итерации. Для алгоритма многокритериальной оптимизации роя частиц размер популяции составлял 200 частиц, размер репозитория – 200 элементов, а количество итераций – 50. Личный коэффициент обучения составлял 1,2, коэффициент социального обучения – 2, инерционный вес – 0,5 и коэффициент демпфирования инерционного веса – 0,95. Расчет был окончен при достижении заданного

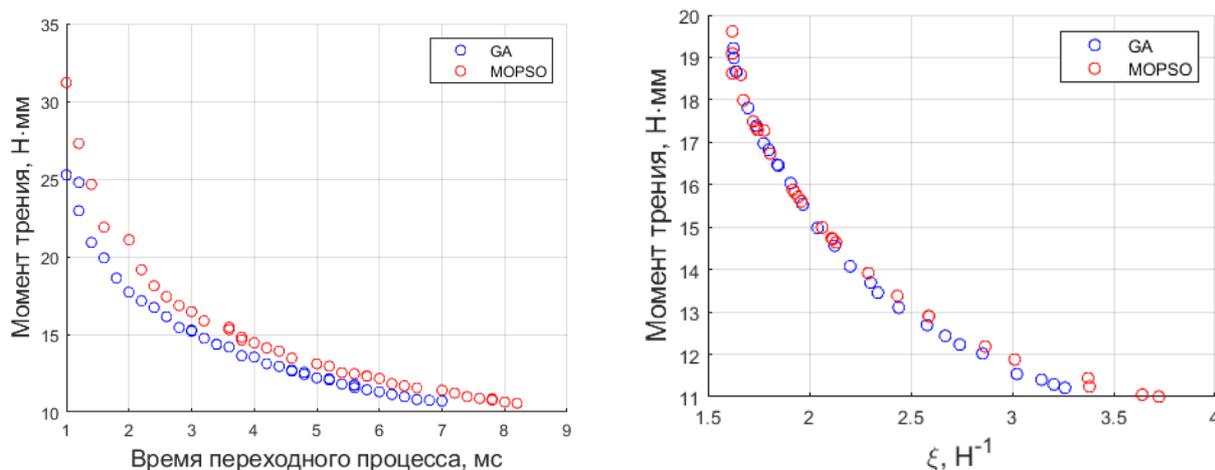
количества итераций. Для проведения расчетов использовался персональный компьютер: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11600K @ 3,90GHz 3,91 GHz, 16 Гб оперативной памяти, SSD 250 Gb.

В рамках вычислительного эксперимента была построена передняя сторона фронта Парето для двух пар целевых параметров, как показано на рис. 2. Как видно на рис. 2а, снижение момента трения влечет за собой уменьшение максимальной управляющей силы. Согласно данным на рис. 2б, минимальный момент трения возможен только при значительном снижении устойчивости роторной системы. Это подтверждает отмеченный ранее конфликт между обозначенными парами переменных. Таким образом, выбор подходящего решения задачи параметрического синтеза должен ба-

зироваться на балансе между использованными критериями.

Трехмерный фронт Парето был рассчитан для всех трех оптимизационных критериев двумя упомянутыми выше эвристическими алгоритмами, GA и MOPSO. В графическом виде полученный фронт показан на рис. 3.

Полученный фронт Парето включает в себя 200 точек, соответствующих полученным оптимальным решениям. Выбор того или иного решения в базовом случае происходит с учетом значений целевых функций по осям координат. Так, параметр «Время переходного процесса» связан с устойчивостью базовой роторной системы, то есть в неуправляемом подшипнике. Параметр  $\xi$  отражает управляемость получаемого на его основе активно смазываемого подшипника.



**Рис. 2.** Набор эффективных целевых параметров «Момент трения – Время переходного процесса» и «Момент трения – Максимальная управляющая сила»

**Fig. 2.** A set of effective objective parameters “Friction torque – Transient time” and “Friction torque – Maximum control action”

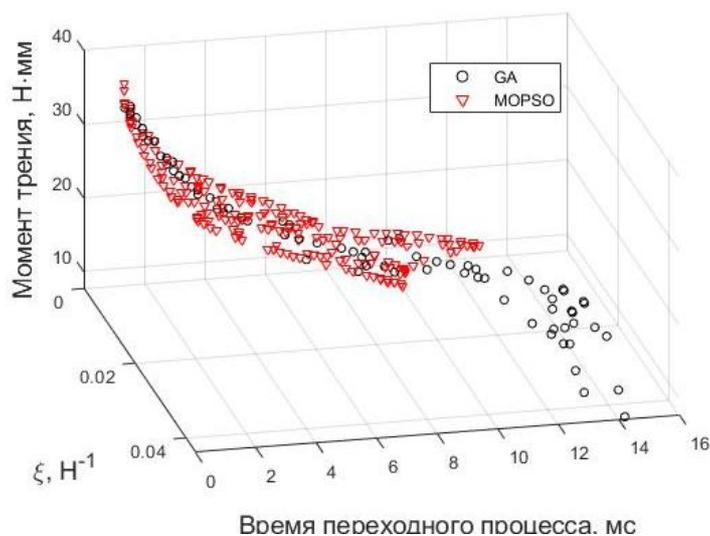


Рис. 3. Трехмерный фронт Парето

Fig. 3. Three-dimensional Pareto front

Данная диаграмма позволяет смещать приоритеты при выборе конкретного решения исходя из планируемых условий эксплуатации роторной машины. Таким образом, смещая приоритет в одну из сторон, можно добиться лучшего решения с точки зрения интегральных или динамических характеристик роторно-опорного узла или управляемости роторной системы.

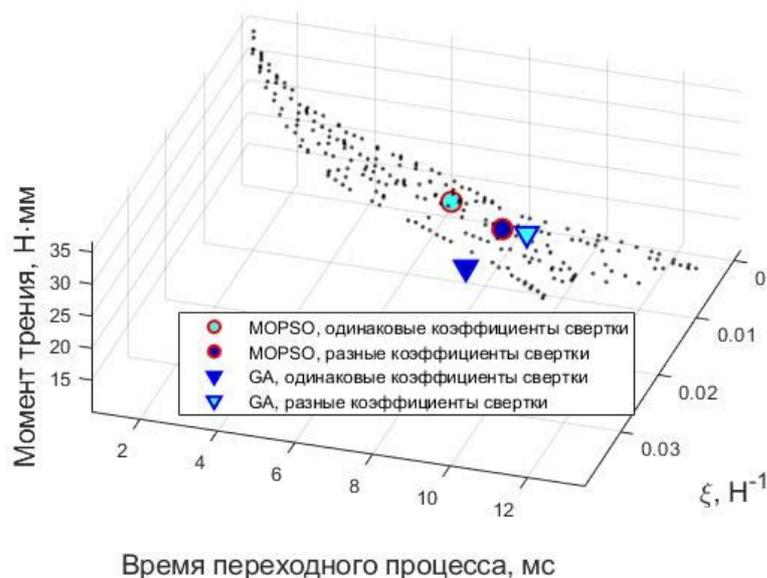
На данном этапе задача многокритериальной оптимизации не имеет единого решения, а выбор конкретного технического решения остается за проектировщиком. Применение методов принятия решений позволяет значительно упростить получение итогового решения, приводя рассмотренную задачу к однокритериальной. К подобным методам относятся: метод линейной свертки [26], метод нечеткой оптимизация Белмана-Затеха [27], метод идеальной точки (TOPSIS) [28], метод многомерного анализа решений (LILMAP) [29]. В дан-

ной работе рассматривался метод линейной свертки параметров, имеющий в своей основе оценку взвешенной суммы нормализованных целевых критериев:

$$N = \omega_1 \cdot \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} + \omega_2 \cdot \frac{M_{\text{тр}}}{M_{\text{тр}}} + \omega_3 \cdot \frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{max}}}, \quad (6)$$

где  $\omega_i$  – коэффициент веса каждого критерия,  $\Delta\omega_i = 1$ .

Подбор весовых коэффициентов в данном случае производится исходя из важности конкретного критерия для того или иного случая проектируемого опорного узла. В данном исследовании были протестированы 2 набора весовых коэффициентов: 1) все критерии равнозначны и их веса равны:  $\omega_i = [0.333 \ 0.333 \ 0.333]$ ; 2) критерий управляемости менее значителен по отношению к параметрам, отражающим динамические и интегральные параметры роторно-опорного узла:  $\omega_i = [0.45 \ 0.45 \ 0.1]$ . Результаты решения задачи однокритериальной оптимизации представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Результаты решения задачи линейной свертки целевых функций

**Fig. 4.** Results of solving the problem of linear convolution of objective functions

Как видно на рис. 4, наблюдаются значимые различия между полученными решениями задачи оптимизации, сведенной к однокритериальной форме. Алгоритм многокритериальной оптимизации роя частиц MOPSO рассчитал конфигурации роторно-опорных узлов со значительно меньшим временем переходного процесса, но сравнительно высоким моментом трения.

Изменение коэффициентов свертки также имеет различное значение для представленных алгоритмов. Для генетического алгоритма GA изменение весов в сторону улучшения трибологических параметров и переходного процесса позволило при снижении управляющей силы на 65% незначительно снизить момент трения (на 7%) и время переходного процесса (на 12%), что, в целом, является закономерным результатом.

Алгоритм многокритериальной оптимизации роя частиц MOPSO при

применении различных коэффициентов свертки позволил получить конфигурацию, значительно уступающую варианту с одинаковыми весами. Данный эффект может быть объяснен наличием большого количества локальных минимумов, для преодоления которых требуется точная настройка представленных алгоритмов. В табл. 1 представлены геометрические параметры, описывающие полученные решения, а также значения целевых функций для представленных конфигураций роторно-опорных узлов.

Для детального тестирования полученных решений был проведен вычислительный эксперимент с использованием имитационной модели. В его ходе тестируемая роторно-опорная система на рабочей частоте 3000 об/мин подвергалась различным нагрузкам как при включенной, так и при отключенной системе управления.

**Таблица 1.** Геометрические и силовые параметры роторно-опорного узла**Table 1.** Geometric and force parameters of the rotor-bearing system

Параметр / Parameter	Генетический алгоритм / Genetic algorithm		Оптимизация роя частиц / Optimization of a swarm of particles	
	Одинаковые коэффициенты свертки / Same convolution coefficients	Разные коэффициенты свертки / Different convolution coefficients	Одинаковые коэффициенты свертки / Same convolution coefficients	Разные коэффициенты свертки / Different convolution coefficients
Длина подшипника, мм	46,2	20,1	51,4	45
Радиальный зазор, мкм	77,2	40	66,3	70,4
Диаметр канала подвода смазки, мм	0,98	1,56	1,3	0,8
Длина канала подвода смазки, мм	8,57	10,2	9,4	9,8
Ширина гидростатического кармана, % от ширины подшипника	48,47	27,4	9,2	55
Длина гидростатического кармана, градусов	31,88	32,4	38,8	6,8
Глубина гидростатического кармана, % от радиального зазора	950	250,4	686	950
Момент трения, Н·м	0,114	0,0123	0,0128	0,0150
Время переходного процесса, мс	7,4	8,4	6,4	7,8
Максимальная управляющая сила, Н	112	322	400	294

Последний случай характеризуется постоянным и равным давлением подачи смазки во все питающие камеры. Сценарий эксперимента включал следующие этапы:

– управление выключено, ротор свободно перемещается из центра подшипника в равновесное положение, оценивается переходный процесс;

– на ротор действует импульс силы величиной в 2 его веса и продолжительностью 3 мс, оценивается переходный процесс;

– к ротору добавляется несбалансированная масса с плечом  $d=1 \cdot 10^{-4}$  м, оценивается установившаяся амплитуда колебаний;

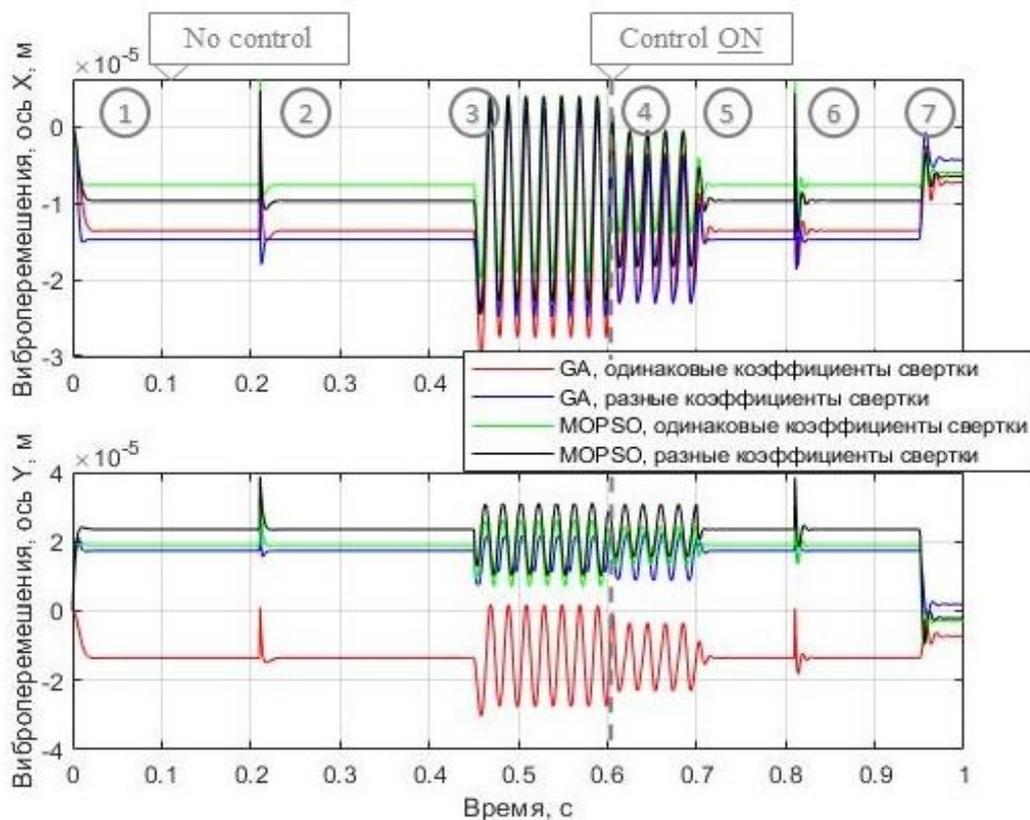
– включается П-регулятор положения ротора с уставкой в точке равновесия сбалансированного ротора (приблизительно центр орбиты ротора), оценивается степень снижения амплитуды относительно этапа 3;

– дисбаланс ротора убирается, контроллер остается включенным;

– к ротору прикладывается импульс силы как на этапе 2, оценивается амплитуда перемещений и время переходного процесса в регулируемой системе относительно показателей пассивной системы на этапе 2;

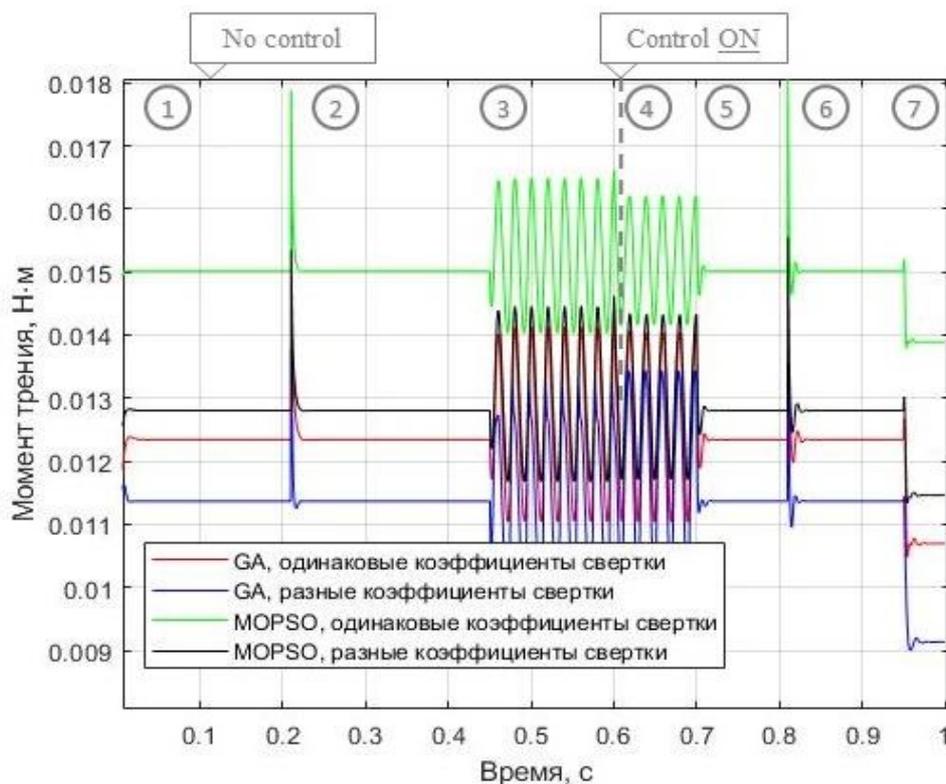
– уставка контроллера положения ротора изменяется на удаленную от предыдущей, оценивается переходный процесс в регулируемой системе.

График перемещений ротора по осям координат для всех выбранных конфигураций приведен на рис. 5, а график изменения трения при этом – на рис. 6.



**Рис. 5.** Результаты вычислительного эксперимента – виброперемещения при различных конфигурациях роторной системы

**Fig. 5.** The results of the computational experiment – vibrational displacement with different configurations of the rotor system



**Рис. 6.** Результаты вычислительного эксперимента – момент трения для различных конфигураций роторной системы

**Fig. 6.** The results of the computational experiment – friction torque with different configurations of the rotor system

Полученные результаты в целом подтверждают наличие у протестированных конфигураций характерных черт, заданных при выборе соответствующих решений оптимизационной задачи. Результаты показали, что конфигурации, полученные при помощи генетического алгоритма, имеют худшую динамику роторной системы по сравнению с результатами алгоритма многоцелевой оптимизации роя частиц, а именно худший переходный процесс и большую амплитуду колебаний при наличии постоянного дисбаланса. Конфигурации, полученные при помощи алгоритма роя частиц, работают в целом при меньших эксцентриситетах ( $\epsilon =$

0,3 для MOPSO – разные коэффициенты,  $\epsilon = 0,36$  для MOPSO – одинаковые коэффициенты,  $\epsilon = 0,4$  для GA – одинаковые коэффициенты,  $\epsilon = 0,56$  для GA – разные коэффициенты).

Необходимо отметить, что различия между всеми конфигурациями по длительности переходного процесса не столь выражены, хотя эти решения значительно удалены друг от друга согласно рис. 6. Это говорит о необходимости улучшения критерия, описывающего устойчивость системы. Максимальный размах колебаний, полученный при увеличении дисбаланса ротора, меньше для конфигураций, полученных генетическим алгоритмом (64 мкм для MOPSO –

разные коэффициенты, 59 мкм для MOPSO – одинаковые коэффициенты, 49 мкм для GA – одинаковые коэффициенты, 42 мкм для GA – разные коэффициенты). Это может быть связано с меньшей устойчивостью ротора, находящегося ближе к геометрическому центру подшипника скольжения.

При этом, параметр  $R_{\max}$  достаточно адекватно отражает способность подшипника минимизировать отклонения ротора от уставки как при импульсных, так и при гармонических силовых воздействиях. Он может быть использован для определения конфигурации подшипника, наиболее эффективно реализующего управляющие воздействия на ротор. Кроме того, в целом можно сделать вывод, что применение системы управления позволяет снизить отклонения роторной системы ниже по сравнению с пассивной системой для всех представленных конфигураций, даже для наименее стабильных.

Одним из ключевых вопросов, решаемых в данном исследовании, был выбор наиболее подходящего алгоритма оптимизации. Приведенные выше результаты говорят о некотором преимуществе генетического алгоритма ввиду того, что: 1) Парето-оптимальные кривые показывают лучшие результаты по минимизации целевых функций по сравнению с алгоритмом роя частиц (см. рис. 2); 2) трехмерный фронт Парето охватывает больший диапазон изменения целевых параметров (см. рис. 3); результаты свертки при разных весовых

коэффициентах имеют более ожидаемый характер по отношению к результатам, полученным при помощи алгоритма роя частиц (см. рис. 4). Однако вторым важным параметром, помимо точности, является требуемый объем вычислений. Так, генетический алгоритм решил задачу однокритериальной оптимизации за 30 итераций, используя 5910 обращений к основной функции имитационной модели. Алгоритм роя частиц решил задачу за 7 итераций, используя 2184 обращений к функции. Можно констатировать, что выбор алгоритма решения задачи оптимального синтеза активных роторно-опорных узлов является компромиссной задачей.

Таким образом, представленный подход к оптимальному проектированию подшипников скольжения можно оценить как в целом состоятельный, но требующий дополнений и улучшений. Он позволяет получать решения, подготовленные для эффективной реализации систем управления. Кроме того, рационально дополнить новыми критериями, такими как расход смазочного материала. Также дальнейшее совершенствование целесообразно проводить в направлении повышения скорости расчетов, особенно при рассмотрении моделей гибких роторов, работающих в закритических областях.

## Выводы

Работа предлагает подход к оптимальному проектированию подшипников жидкостного трения с учетом как

динамических свойств получаемой роторно-опорной системы, так и возможностей реализации на их основе управления движением ротора. Для этого на примере подшипника с активной смазкой сформулирована и решена многокритериальная оптимизационная задача. В ходе исследования были сопоставлены процедуры и результаты такого решения, полученные с использованием двух различных эвристических алгоритмов, генетического, и роя частиц. Оба алгоритма позволили получить близкие друг к другу трехмерные фронты Парето оптимальных решений. Единственные решения были получены с применением процедуры линейной свертки с различными наборами весо-

вых коэффициентов и протестированы с использованием имитационной модели роторно-опорной системы. Генетический алгоритм показал лучшие возможности по минимизации целевых функций, более широкий диапазон получаемых решений, а также более прогнозируемое поведение системы при применении процедуры линейной свертки. Алгоритм роя частиц показал значительное, почти трехкратное преимущество в скорости решения оптимизационной задачи. Полученные сведения можно использовать при выборе алгоритмической базы для решения задачи оптимального параметрического синтеза активных опор роторов.

### Список литературы

1. Dekker M., Inc.: Handbook of turbomachinery. New York. 1995.
2. Чернавский С. А. Подшипники скольжения. М.: МАШГИЗ, 1963.
3. Hummel Ch.: Kritische Drehzahlen als Folge der Nachgiebigkeit des Schmiermittels im Lager. Forschungsarbeiten VDI. 1926.
4. Yamamoto T., Ishida Y.: Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications. John Willey&Sons. New York, 2001.
5. Chen W. J., Gunter E. J.: Introduction to Dynamics of rotor-bearing systems. TRAFFORD PUB. 2005.
6. Defect-free optimal synthesis of crank-rocker linkage using nature-inspired optimization algorithms / R. Singh, C. Singh, H. Amit, S. Amit // Mechanism and Machine Theory. 2017. № 116. P. 105-122.
7. Panda S., Nanda N., Mishra D. Comparative study on optimum design of rolling element bearing // Tribology International. 2015. № 92. P. 595-604.
8. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment / K. Lu, Yu. Jin, P. Huang, F. Zhang, H. Zhang, Ch. Fu, Yu. Chen // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. №150. P. 107236.

9. Onunka C., Gobler H., Bright G. A stability optimization model for shaft rotor-bearing systems // *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2016. № 8. P. 1-12.

10. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems / K. Lu, Yu. Jin, Yu. Chen, Y. Yang, L. Hou, Z. Zhang, Z. Li, Ch. Fu // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. № 123. P. 264-297.

11. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning / S. Li, A. Babin, D. Shutin, Yu. Kazakov, Y. Liu, Z. Chen, L. Savin // *Tribology International*. 2022. №175. P. 107805.

12. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006. № 48. P. 1341-1351.

13. Zhang J., Talke F. E. Optimization of slider air bearing contours using the combined genetic algorithm-subregion approach // *Tribology International - TRIBOL INT*. 2005. № 38. P. 566-573.

14. Güllüce H., Özdemir K. Design and operational condition optimization of a rotary regenerative heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2020. № 177. P. 115341.

15. Fast surrogate-assisted particle swarm optimization algorithm for computationally expensive problems / F. Li, W. Shen, X. Cai, L. Gao, G. A. Wang // *Applied Soft Computing*. 2020. № 92. P. 106303.

16. Rodrigues D., Albuquerque V., Papa J. A Multi-Objective Artificial Butterfly Optimization Approach for Feature Selection // *Applied Soft Computing*. 2020. № 94.

17. Wen X. Modeling and performance evaluation of wind turbine based on ant colony optimization-extreme learning machine // *Applied Soft Computing*. 2020. № 94. P. 106476.

18. Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems / M. Javed, T. Ma, J. Jurasz, S. Ahmed, J. Mikulik // *Energy*. 2020. № 210. P. 118599.

19. Jensen K., Santos I. Design of actively-controlled oil lubrication to reduce rotor-bearing-foundation coupled vibrations - theory & experiment // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2022. № 236.

20. *Encyclopedia of Tribology* // *Encycl. Tribol*. 2013.

21. Peculiarities of reactions control for rotor positioning in an active journal hybrid bearing / L. Savin, R. Polyakov, D. Shutin, A. Babin // *International Journal of Mechanics*. 2016. № 10. P. 62-67.

22. Dmochowski W. M., Dadouche A., Fillon M. Finite Difference Method for Fluid-Film Bearings // *Encyclopedia of Tribology*. 2013. P. 1137-1143.

23. San Andres, L. Notes 14. Experimental identification of bearing force coefficients. 2009. URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/93254> (accessed 09.01.2022).

24. Shutin D., Polyakov R. Adaptive nonlinear controller of rotor position in active hybrid bearings. 2016. P. 1-6.
25. Mattox D., Wang Q., Chung Y.: Encyclopedia of Tribology // Encycl. Tribol. 2013. P. 2717-2726.
26. Айзерман М. А., Алескеров Ф. Т. Выбор вариантов. Основы теории. М.: Наука, 1990.
27. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment // Management Science. 1970. №. 4. P. 141–164.
28. Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications // BerlinHeidelberg New York, Springer-Verlag. 1981.
29. Rubiano J., Nucamendi S., Cordero F., Cordero A., Rodríguez M., Alejandro an improved LINMAP for multicriteria decision: designing customized incentive portfolios in an organization // Operational Research. 2022. № 22.

### References

1. Dekker M. Inc.: *Handbook of turbomachinery*. New York, 1995.
2. Chernavskiy S. A. *Podshipniki skoljeniya* [Sliding bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1963.
3. Hummel Ch. *Kritische Drehzahlen als Folge der Nachgiebigkeit des Schmiermittels im Lager*. Forschungsarbeiten VDI, 1926.
4. Yamamoto T., Ishida Y. *Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications*. John Willey&Sons, New York, 2001.
5. Chen W. J., Gunter E. J. *Introduction to Dynamics of rotor-bearing systems*. TRAFFORD PUB, 2005.
6. Singh R., Singh C., Amit H., Amit S. Defect-free optimal synthesis of crank-rocker linkage using nature-inspired optimization algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, no. 116, pp. 105-122.
7. Panda S., Nanda N., Mishra D. Comparative study on optimum design of rolling element bearing. *Tribology International*, 2015, no. 92, pp. 595-604.
8. Lu K., Jin Yu., Huang P., Zhang F., Zhang H., Fu Ch., Chen Yu. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, no. 150, 107236 p.
9. Onunka C., Gobler H., Bright G. A stability optimization model for shaft rotor-bearing systems. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2016, no. 8, pp. 1-12.
10. Lu K., Jin Yu., Chen Yu., Yang Y., Hou L., Zhang Z., Li Z., Fu Ch. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, no. 123, pp. 264-297.

11. Li S., Babin A., Shutin D., Kazakov Yu., Liu Y., Chen Z., Savin L. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning. *Tribology International*, 2022, no. 175, 107805 p.

12. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, no. 48, pp. 1341-1351.

13. Zhang J., Talke F. E. Optimization of slider air bearing contours using the combined genetic algorithm-subregion approach. *Tribology International - TRIBOL INT*, 2005, no. 38. P. 566-573.

14. Güllüce H., Özdemir K. Design and operational condition optimization of a rotary regenerative heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2020, no. 177, 115341 p.

15. Li F., Shen W., Cai X., Gao L., Wang G. A fast surrogate-assisted particle swarm optimization algorithm for computationally expensive problems. *Applied Soft Computing*, 2020, no. 92, 106303 p.

16. Rodrigues D., Albuquerque V., Papa J. A Multi-Objective Artificial Butterfly Optimization Approach for Feature Selection. *Applied Soft Computing*, 2020, № 94.

17. Wen X. Modeling and performance evaluation of wind turbine based on ant colony optimization-extreme learning machine. *Applied Soft Computing*, 2020, no. 94, 106476 p.

18. Javed M., Ma T., Jurasz J., Ahmed S., Mikulik J. Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems. *Energy*, 2020, no. 210, 118599 p.

19. Jensen K., Santos I. Design of actively-controlled oil lubrication to reduce rotor-bearing-foundation coupled vibrations - theory & experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2022, no. 236.

20. *Encyclopedia of Tribology*. Encycl. Tribol. 2013.

21. Savin L., Polyakov R., Shutin D., Babin A. Peculiarities of reactions control for rotor positioning in an active journal hybrid bearing. *International Journal of Mechanics*, 2016, no. 10, pp. 62-67.

22. Dmochowski W. M., Dadouche A., Fillon M. Finite Difference Method for Fluid-Film Bearings. *Encyclopedia of Tribology*, 2013, pp. 1137–1143.

23. San Andres L. *Notes 14. Experimental identification of bearing force coefficients*. 2009. Available at: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/93254> (accessed 09.01.2022).

24. Shutin D., Polyakov R. Adaptive nonlinear controller of rotor position in active hybrid bearings, 2016, pp. 1-6.

25. Mattox D., Wang Q., Chung Y. *Encyclopedia of Tribology*. *Encycl. Tribol*, 2013, pp. 2717-2726.

26. Aizerman M. A., Aleskerov F. T. *Vibor variantov. Osnovi teorii* [Choice of options. Fundamentals of theory]. Moscow, Nauka Publ., 1990.

27. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*, 1970, no. 4, pp. 141–164.
28. Hwang C. L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg; New York, Springer-Verlag, 1981.
29. Rubiano J., Nucamendi S., Cordero F., Cordero A., Rodríguez M. Alejandro an improved LINMAP for multicriteria decision: designing customized incentive portfolios in an organization. *Operational Research*, 2022, no. 22.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Фетисов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, ассистент кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: fetisov57rus@mail.ru, SPIN-код: 1662-8088, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3397-9863>

**Alexander S. Fetisov**, Cand. of Sci. (Engineering), Assistant of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: fetisov57rus@mail.ru, SPIN-код: 1662-8088, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3397-9863>

**Литовченко Максим Геннадьевич**, студент кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: yamaks123@bk.ru

**Maksim G. Litovchenko**, Student of Mechatronics, Mechanics and Robotics Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: yamaks123@bk.ru

**Шутин Денис Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: rover@gmail.ru, SPIN-код: 8308-0143, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0515-7106>

**Denis V. Shutin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Mechatronics, Mechanics and Robotics Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: rover@gmail.ru, SPIN-код: 8308-0143, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0515-7106>

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>

## Оптимизация процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде

Е. В. Агеева <sup>1</sup>✉, Н. М. Хорьякова <sup>1</sup>, Б.Н. Сабельников <sup>1</sup>, А. Е. Агеева <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

### Резюме

**Целью** настоящей работы являлось проведение оптимизации процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде.

**Методы.** Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы спеченного безвольфрамового твердого сплава марки ТН20. В качестве рабочей жидкости применялась вода дистиллированная. На экспериментальной запатентованной установке для получения порошков из токопроводящих материалов диспергировали отходы безвольфрамового твердого сплава ТН20 в воде дистиллированной при массе загрузки 500 г. При этом использовали следующие электрические параметры установки: ёмкость конденсаторов 60,0...62,5 мкФ; напряжение на электродах от 120...140 В; частота следования импульсов 120...140 Гц. Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных ЭЭД отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды). Средний размер частиц титанового порошка исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» (Германия). Оптимизацию процессов диспергирования отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20 проводили постановкой полного факторного эксперимента по среднему размеру частиц получаемых электроэрозионных частиц согласно блок-схемам.

**Результаты.** Анализ параметров формы частиц твердосплавного порошка по изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют в основном сферическую форму и агломераты. Экспериментально установлено, что средний размер частиц твердосплавного порошка 24,4 мкм получается при ёмкости разрядных конденсаторов 63 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

**Заключение.** Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов сплава ТН20 и повторное их использование в производстве режущего инструмента.

**Ключевые слова:** металлоотходы сплава ТН20; электроэрозионное диспергирование; порошок; средний размер частиц; оптимизация.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00316, <https://rscf.ru/project/24-29-00316/>.

© Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Сабельников Б.Н., Агеева А. Е., 2024

**Для цитирования:** Оптимизация процесса получения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава TN20 в воде / Е. В. Агеева, Н. М. Хорьякова, Б.Н. Сабельников, А. Е. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 27-43. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Подписана в печать 10.02.2024

Опубликована 27.03.2024

## Optimization of the Process of Obtaining Powder Materials for the Production of Carbide Cutting Tools by Electrodispersion of Tn20 Alloy Metal Waste in Water

Ekaterina V. Ageeva <sup>1</sup>✉, Natalya M. Horyakova <sup>1</sup>, Boris N. Sabelnikov <sup>1</sup>,  
Anna E. Ageeva <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

### Abstract

**Purpose** of this work was to optimize the process of obtaining powder materials for the production of carbide cutting tools by electrodispersing metal waste of TN20 alloy in water.

**Methods.** To carry out the planned studies, waste of sintered tungsten-free hard alloy of the TN20 brand was selected. Distilled water was used as the working fluid. On an experimental patented installation for the production of powders from conductive materials, waste of a tungsten-free hard alloy TN20 was dispersed in distilled water with a loading weight of 500 g. The following electrical parameters of the installation were used: capacitance of capacitors 60.0...62.5 UF; voltage at the electrodes from 120...140 V; pulse repetition frequency 120...140 Hz. The study of the shape and morphology of the surface of particles obtained by EED of waste of a tungsten-free hard alloy TN20 was carried out on an electron-ion scanning (scanning) microscope with field emission of electrons "QUANTA 600 FEG" (the Netherlands). The average particle size of titanium powder was studied using the Analysette 22 NanoTec laser particle size analyzer (Germany). Optimization of the processes of dispersion of waste of tungsten-free hard alloy TN20 was carried out by setting up a complete factorial experiment on the average particle size of the resulting erosive particles according to block diagrams.

**Results.** Analysis of the particle shape parameters of the carbide powder from images from a scanning microscope suggests that the electroerosive particles are mainly spherical in shape and agglomerates. It has been experimentally established that the average particle size of a carbide powder of 24.4 microns is obtained with a discharge capacitor capacity of 63 UF, an electrode voltage of 200 V, and a pulse repetition frequency of 200 Hz.

**Conclusion.** Carrying out the planned measures will solve the problem of recycling waste from TN20 alloy and their reuse in the production of cutting tools.

**Keywords:** TN20 alloy metal waste; electroerosive dispersion; powder; average particle size; optimization.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-29-00316, <https://rscf.ru/project/24-29-00316/>.

**For citation:** Ageeva E. V., Horyakova N. M., Sabelnikov B. N., Ageeva A. E. Optimization of the Process of Obtaining Powder Materials for the Production of Carbide Cutting Tools by Electrodipersion of Tn20 Alloy Metal Waste in Water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 27-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-27-43>.

Received 18.01.2024

Accepted 10.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

## Введение

В настоящее время безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) группы ТН на основе карбида титана, сцементированного никель-молибденовым сплавом, нашли широкое применение для обработки металлов резанием [1]. TiC по твердости превосходит WC, но материалы на их основе уступают вольфрамосодержащим твердым сплавам по прочности [2]. Промышленное производство БВТС предусматривает спекание в вакууме при температуре 1300...1350° и выдержке 0,5...1 ч. Остаточная пористость при этом составляет порядка 0,2% [3].

В настоящее время основными проблемами при создании инструментальных БВТС является применение для его производства дорогостоящих компонентов [4]. Рециклинг металлоотходов инструментального производства является приоритетным направлением развития современного металлургического производства [5]. Однако это развитие сдерживается проблемой чрезвычайно высокой стоимости таких материалов, связанной с дефицитностью компонентов, технологической сложностью и дороговизной их получения [6]. Одним из путей решения названной проблемы яв-

ляется переработка в мелкодисперсное сырье легковесных металлоотходов [7], содержащих дорогостоящие компоненты такие, как Ti, Mo, и др., силами собственных производственных мощностей предприятий при минимальных затратах энергии и экологическом уровне окружающей среды [8].

Существующие в настоящее время способы переработки отходов безвольфрамовых твердых сплавов являются крупнотоннажными, энергоемкими, экологически вредными и дорогостоящими [9]. Одним из эффективных промышленно неприменяемых и недостаточно изученных металлургических способов переработки любых токопроводящих легковесных металлоотходов, в том числе и отходов твердых сплавов, лишенный вышеперечисленных недостатков, является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД) [10]. К настоящему времени в реальном производстве данный способ практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц сплава ТН20 [11].

Целью настоящей работы являлось проведение оптимизации процесса полу-

чения порошковых материалов для производства твердосплавного режущего инструмента электродиспергированием металлоотходов сплава ТН20 в воде.

### Материалы и методы

Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы спеченного безвольфрамового твердого сплава марки ТН20 [12]. Химический состав сплава в соответствии с ГОСТ 26530–85 следующий: Ni до 15%; Mo до 6 %; Nb до 0,1%; TiC остальное. В качестве рабочей жидкости (РЖ) применялась вода дистиллированная ГОСТ Р 58144-2018.

На экспериментальной запатентованной установке [13] для получения порошков из токопроводящих материалов диспергировали отходы безвольфрамового твердого сплава ТН20 в воде дистиллированной при массе загрузки 500 г. При этом использовали следующие электрические параметры установки: ёмкость конденсаторов 60,0...62,5 мкФ; напряжение на электродах от 120...140 В; частота следования импульсов 120...140 Гц. Блок-схема процесса электродиспергирования металлоотходов сплава ТН20 представлена на рис. 1.

Исследование формы и морфологии поверхности частиц, полученных ЭЭД отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (Нидерланды) [14].

Методика исследования формы частиц представлена в виде блок-схемы на рис. 2.

Средний размер частиц титанового порошка исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» (Германия) [15]. Блок-схема методики исследования гранулометрического состава представлена на рис. 3.

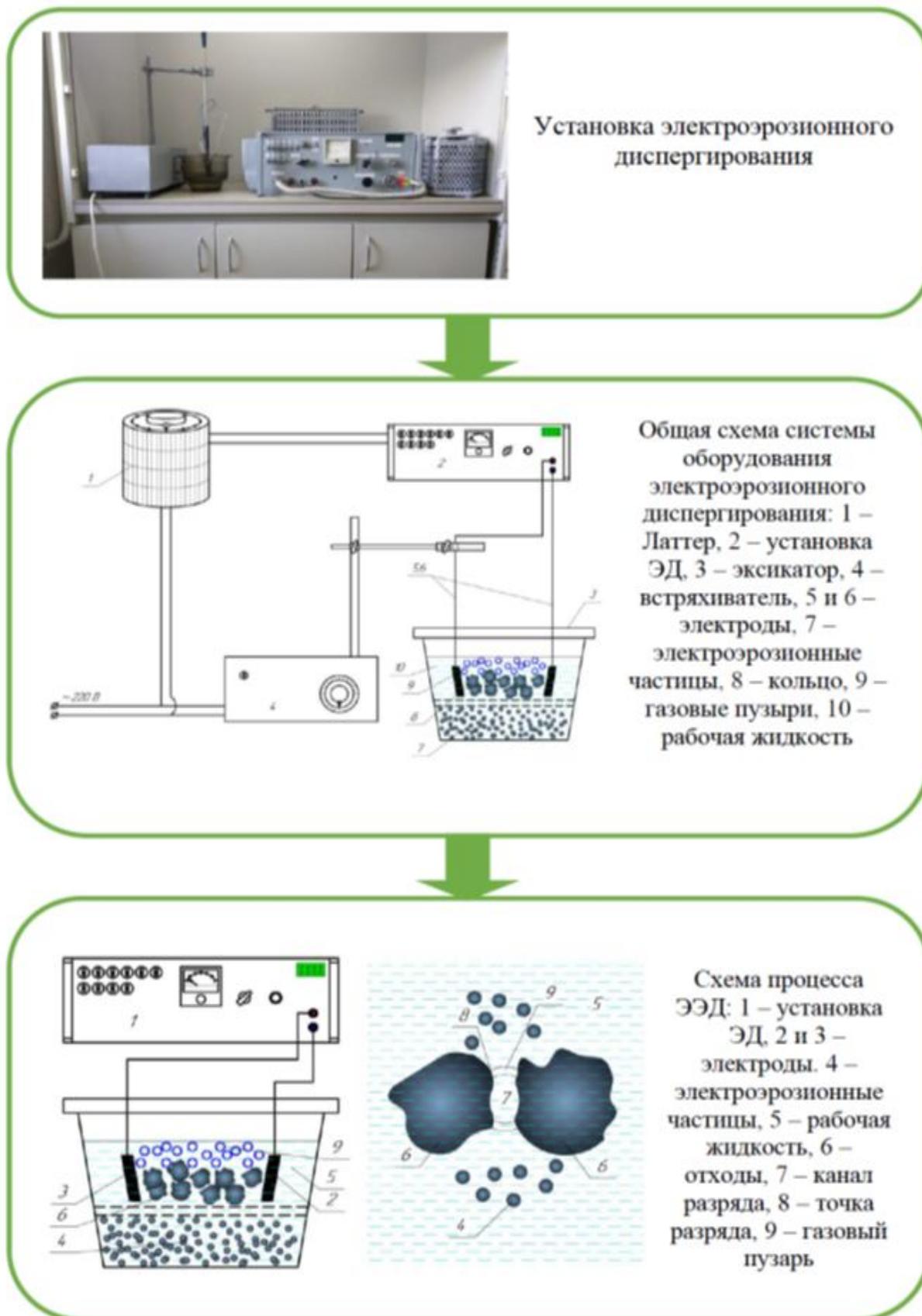
### Результаты и их обсуждение

Анализ параметров формы [16] частиц твердосплавного порошка по изображениям с растрового микроскопа говорит о том, что электроэрозионные частицы имеют в основном сферическую форму и агломераты (рис. 4).

Оптимизацию процессов диспергирования отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20 проводили постановкой полного факторного эксперимента (ПФЭ) [17] по среднему размеру получаемых электроэрозионных частиц согласно блок-схемам (рис. 5 и 6).

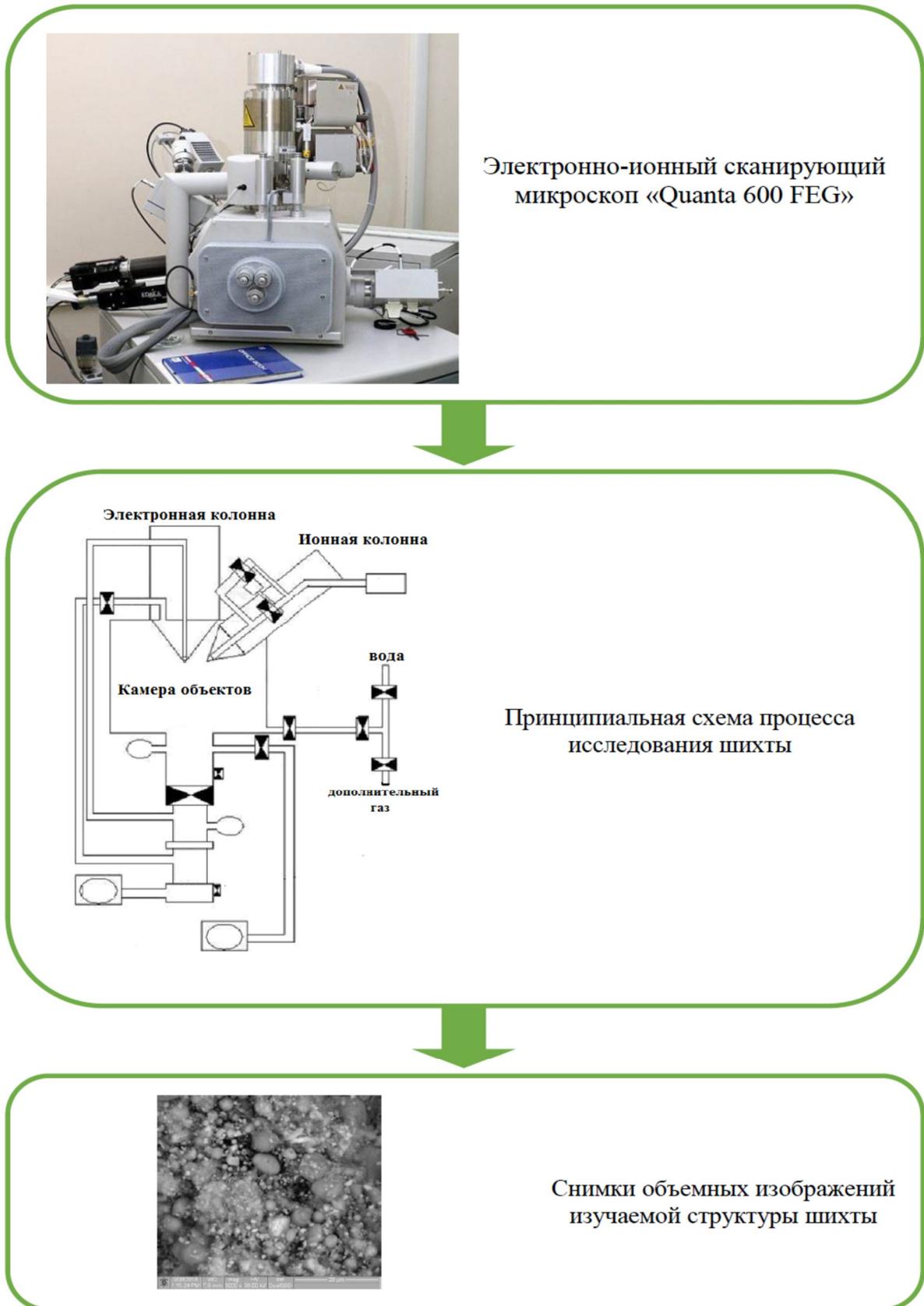
Задача оптимизации сводится к опытному определению такого сочетания уровней факторов, при котором достигается максимальное (минимальное) значение выходного параметра. Для этого используют метод крутого восхождения Бокса и Уилсона [18]. Блок-схема методики расчета крутого восхождения представлена на рис. 7.

В качестве факторов были выбраны параметры работы установки ЭЭД: напряжение на электродах, емкость разрядных конденсаторов и частота следования импульсов [19].



**Рис. 1.** Блок-схема процесса электродиспергирования металлоотходов сплава TN20

**Fig. 1.** Block diagram of the electrodispersion process of TN20 alloy metal waste

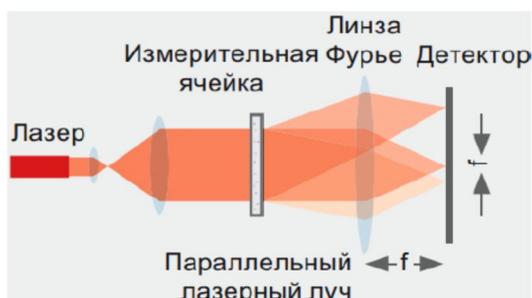


**Рис. 2.** Блок-схема методики исследования формы частиц

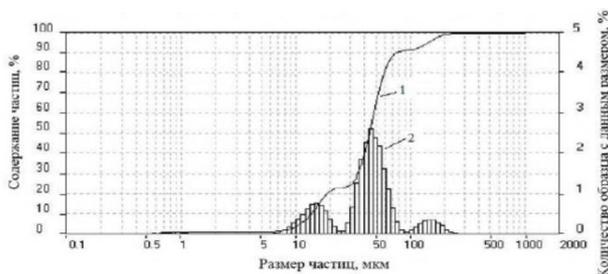
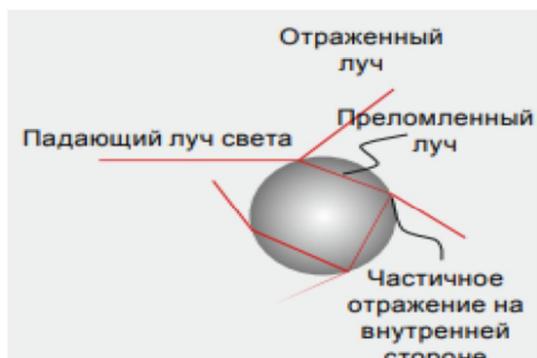
**Fig. 2.** Block diagram of the particle shape research methodology



Лазерный анализатор размеров частиц «Analysette 22 Nano Tec»



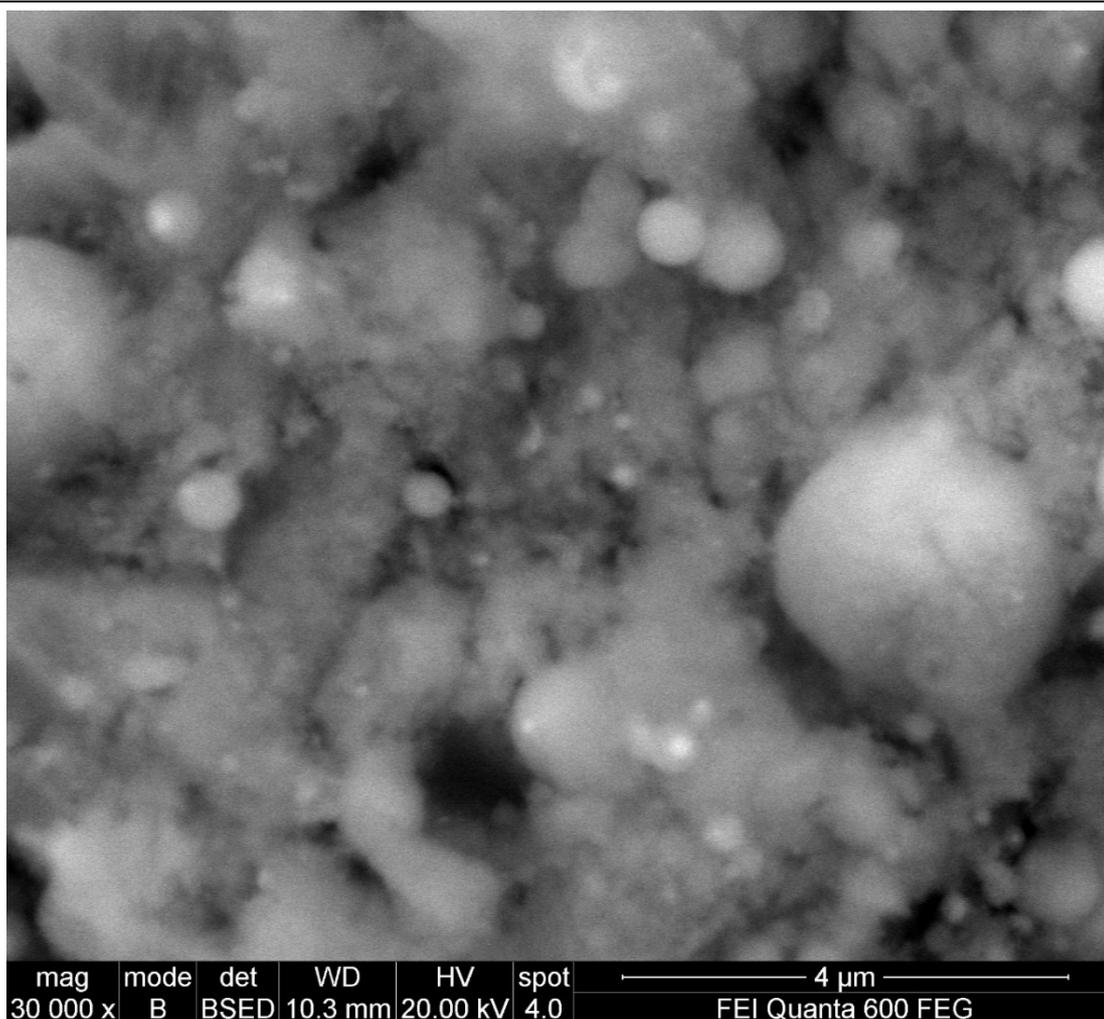
Конструкция состоит из лазера, через измерительную ячейку направленного на детектор. Важным компонентом каждого лазерного прибора для измерения размера частиц является линза Фурье, которая фокусирует рассеянный свет лазера по траектории луча на детектор. Свет, рассеянный пропорционально размеру частиц, посредством линзы фокусируется на детектор.



По распределению рассеянного света при помощи комплексной математики рассчитывают распределение частиц по их размерам. В результате получают объемные доли, соответствующие эквивалентным диаметрам при лазерной дифракции.

Рис. 3. Блок-схема методики определения среднего размера частиц

Fig. 3. Block diagram of the method for determining the average particle size



**Рис. 4.** Микрофотография частиц порошка

**Fig. 4.** Micrography of powder particles

Согласно блок-схемам методики, представленным на рис. 1-3, были выбраны уровни и интервалы варьирования

и составлена матрица планирования для экспериментов (табл. 2).

**Таблица 1.** Уровни и интервалы варьирования

**Table 1.** Levels and intervals of variation

Уровень варьируемых факторов / The level of variable factors	Обозначение кодовое / The designation is code	U, В	v, Гц	C, мкФ
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основной уровень	0	150	72,5	54,3
Интервал варьирования	$\Delta x_i$	50	27,5	8,7
Верхний уровень	+1	200	100	63
Нижний уровень	-1	100	45	45,5

**Таблица 2.** Матрица планирования эксперимента

**Table 2.** Experiment planning matrix

№ п/п	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}_i$	S <sup>2</sup> <sub>воспр</sub>
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,46	0,45	0,44	0,45	0,0001
2	+	+	-	-	-	-	+	+	13,4	13,1	13,1	13,2	0,03
3	+	-	+	-	-	+	-	+	3,0	3,4	3,0	3,2	0,06
4	+	+	+	-	+	-	-	-	18,6	18,7	18,5	18,6	0,01
5	+	-	-	+	+	-	-	+	7,0	7,1	7,1	7,1	0,005
6	+	+	-	+	-	+	-	-	21,3	21,0	21,0	21,1	0,03
7	+	-	+	+	-	-	+	-	11,5	11,6	11,4	11,4	0,025
8	+	+	+	+	+	+	+	+	24,4	24,6	24,0	24,3	0,095

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса использована модель первого порядка вида  
 $\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$   
 где X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> – факторы,

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основной уровень	0			
Интервал варьирования	$\Delta x_i$			
Верхний уровень	+1			
Нижний уровень	-1			

Каждый опыт проводится трижды (y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, y<sub>3</sub>).  
 Используя уравнения  $X_1 = \frac{u-o}{\Delta x_{i(u)}}$ ;  $X_2 = \frac{v-o}{\Delta x_{i(v)}}$ ;  $X_3 = \frac{c-o}{\Delta x_{i(c)}}$ , перекодируем значения факторов и составим матрицу планирования эксперимента.

№ опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	$\bar{y}_i$	S <sup>2</sup> <sub>воспр<sub>i</sub></sub>
1	+	-	-	-	+	+	+	-					
2	+	+	-	-	-	-	+	+					
3	+	-	+	-	-	+	-	+					
4	+	+	+	-	+	-	-	-					
5	+	-	-	+	+	-	-	+					
6	+	+	-	+	-	+	-	-					
7	+	-	+	+	-	-	+	-					
8	+	+	+	+	+	+	+	+					

**Рис. 5.** Блок-схема постановки полного факторного эксперимента (1 этап)

**Fig. 5.** Flowchart for setting up a complete factorial experiment (stage 1)

$$1. \bar{y}_i = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

2. Определяем дисперсию параллельных опытов:

$$S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

3. Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех опытов  $\sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2$

4. Осуществляем проверку дисперсий с использованием критерия Кохрена:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_{\text{воспр}_i}^2}$$

Сравниваем  $G_{\text{расч}}$  и  $G_{\text{табл}}$ . Если  $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ , принимаем гипотезу об однородности дисперсий. Если  $G_{\text{расч}} > G_{\text{табл}}$ , дисперсия неоднородная.

5. Вычисляем дисперсию воспроизводимости для всех экспериментов

$$S_{\text{восп}}^2 = S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}_i}^2$$

6. Вычисляем ошибку всего эксперимента

$$S(y) = \sqrt{S_{(y)}^2}$$

7. Рассчитываем коэффициенты уравнения

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{in} \bar{y}_i, \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{in} X_{jn} \bar{y}_i$$

8. Составление уравнения регрессии

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3$$



9. Проверяем статистическую значимость коэффициентов.

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}}$$

Далее определяем доверительный интервал длиной  $2\Delta b_i$ :

$$\Delta b_i = t_{\text{табл}} S(b_i)$$

Табличное значение  $t_{\text{табл}}$  выбираем для числа степеней свободы  $f = N(m - 1)$

Сравниваем  $\Delta b_i$  и  $b_i$ . Если  $\Delta b_i > b_i$ , то коэффициент не значимый – исключаем из уравнения регрессии. Если  $\Delta b_i < b_i$ , то коэффициент значимый – оставляем в уравнении регрессии.

10. Проверяем уравнение на адекватность

Находят значения  $F$ - критерия Фишера (дисперсное отношение):

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{восп}}^2} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(y)}$$

Для того чтобы воспользоваться таблицей  $F$ -критерия, необходимо определить число степеней свободы  $f_{\text{ад}}$  и  $f_{\text{восп}}$ :  $f_{\text{ад}} = N - 1$ ,  $f_{\text{восп}} = N(m - 1)$ .

Исходя из найденных значений  $f_{\text{ад}}$ ,  $f_{\text{восп}}$  находим по таблице  $F_{\text{табл}}$ . Если  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ , то уравнение считают адекватным.

Рис. 6. Блок-схема постановки полного факторного эксперимента (2 этап)

Fig. 6. Flowchart for setting up a complete factorial experiment (stage 2)



Рис. 7. Блок-схема расчета крутого восхождения

Fig. 7. Block diagram of calculation of steep ascent

Уравнение регрессии, моделирующее полный факторный эксперимент:

$$\hat{y} = 12,4 + 6,9X_1 + 1,9X_2 + 3,6X_3 + 0,19X_1X_2 - 0,15X_1X_3 - 0,08X_2X_3 - 0,47X_1X_2X_3. \quad (1)$$

В результате проверки статистической значимости коэффициентов все коэффициенты уравнения (1) оказались статистически значимыми. Проверку уравнений на адекватность проводили с использованием критерия Фишера [20].

В результате расчета установлено, что уравнения регрессии адекватны.

Полученные уравнения были использованы для расчета крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни).

Согласно проведенной серии опытов, результаты которых представлены

в табл. 3, определены предельные значения параметра оптимизации  $\hat{y}$  (средний размер электроэрозионных частиц) для процесса ЭЭД, которые составили: 24,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 63 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

**Таблица 3.** Расчет крутого восхождения

**Table 3.** Calculation of the steep ascent

Наименование / Name	$X_1$ (U, В)	$X_2$ (f, Гц)	$X_3$ (C, мкФ)	$\hat{y}$ , мкм
Основной уровень	150	72,5	54,3	
Коэффициент $b_i$	6,9	1,9	3,6	
Интервал варьирования $\xi_i$	50	27,5	8,7	
$b_i \cdot \xi_i$	345	52,25	31,32	
Шаг $\Delta_i$	17,25	2,6	1,5	
Округленный шаг	17	3	2	
Опыт 1	167	75,5	56,3	15,7
Опыт 2	184	78,5	58,3	19,1
Опыт 3	200	81,5	60,3	22,2
Опыт 4	200	84,5	62,3	23,2
Опыт 5	200	87,5	63	23,6
Опыт 6	200	90,5	63	23,7
Опыт 7	200	93,5	63	23,8
Опыт 8	200	96,5	63	24,1
Опыт 9	200	99,5	63	24,2
Опыт 10 (max)	200	100	63	24,4

## Выводы

1. На основании экспериментальных исследований, направленных на численную оптимизацию процесса получения титановых порошков для аддитивных машин в условиях электроэрозионной металлургии отходов безвольфрамового твердого сплава ТН20, установлено, что средний размер частиц по-

рошка 24,4 мкм при ёмкости разрядных конденсаторов 63 мкФ, напряжении на электродах 200 В, частоте следования импульсов 200 Гц.

2. Проведение намеченных мероприятий позволит решить проблему переработки отходов сплава ТН20 и повторное их использование в производстве режущего инструмента.

### Список литературы

1. Патрушев А. Ю., Фарафонов Д. П., Серов М. М. Безвольфрамовые твердые сплавы: методы получения, структура и свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11(105). С. 66-81.
2. Изменение структурно-фазового состояния и физико-химических свойств безвольфрамовых твердых сплавов TiC-TiNi после различных видов ионно-лучевой обработки / В. В. Акимов, А. М. Бадамшин, С. Н. Несов [и др.] // Омский научный вестник. 2021. № 2(176). С. 5-9.
3. Панов В.С. Безвольфрамовые твердые сплавы: аналитический обзор // Материаловедение. 2019. № 10. С. 33-39.
4. Панов В.С., Ниткин Н.М. Безвольфрамовые твердые сплавы // Нанотехнологии: наука и производство. 2017. № 3. С. 65-70.
5. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Материальный баланс процесса электроэрозионного диспергирования отходов безвольфрамовых твердых сплавов марки КНТ16 в воде дистиллированной // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10. № 3. С. 8-19.
6. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Рентгеноспектральный микроанализ электроэрозионного порошкового материала, полученного в среде этилового спирта из отходов безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 7 (242). С. 33-36.
7. Локтионова О.Г., Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Результаты рентгеновских исследований спеченных образцов, полученных из электроэрозионного порошкового материала сплава КНТ16 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10. № 4. С. 22-34.
8. Влияние ионного облучения на морфологию, элементный и химический состав поверхностных слоев безвольфрамовых твердых сплавов / А.М. Бадамшин, С.Н. Несов, В.С. Ковивчак, С.Н. Поворознюк, В.В. Акимов // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 15. С. 19-22.
9. Агеева Е.В., Сабельников Б.Н. Структура и свойства безвольфрамового твердого сплава на основе карбонитрида титана, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в углеродсодержащей среде // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. № 4. С. 158-162.
10. Агеева Е.В., Локтионова О.Г., Сабельников Б.Н. Оценка энергозатрат при получении шихты для производства безвольфрамового твердого сплава электродиспергированием // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021;11(1):21-35.

11. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water // *Metallurgist*. 2022. Vol. 66, nos. 1-2. Pp. 146-154.
12. Агеев Е.В., Агеева А. Е. Структура и свойства порошков, полученных в условиях электроэрозионной металлургии отходов твердого сплава Т5К10 в кислород- и углеродсодержащих средах // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022. №9 (213). С. 387-392.
13. Агеев Е.В., Пыхтин А.И., Новиков Е.П., Агеева А.Е. Параметрические показатели формы частиц электрокорунда, полученного электродиспергированием отходов электротехнического алюминия марки АД0Е // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022;12(4):40-53. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-440-53>.
14. Агеев Е.В., Поданов В.О., Агеева А.Е. Оптимизация процесса изготовления жаропрочного никелевого сплава путем искрового плазменного спекания порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов ЖС6У в воде // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. № 4. С. 170-174.
15. Агеев Е.В., Серебровский В.И., Поданов В.О., Агеева А.Е. Исследование влияния среды диспергирования на свойства жаропрочных порошков, полученных из отходов сплава ЖСУ6 // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022;12(3):39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-39-56>
16. Ageeva E.V. Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water / E.V. Ageev, A.E. Gvozdev, E.A. Protopopov, V.O. Podanov, A.E. Ageeva // *Chebyshevskii sbornik*. 2022. Vol. 23. No. 1. Pp. 197–207.
17. Ageeva E.V. Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heatresistant nickel alloy ZHS6U / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, A.E. Gvozdev, E.A. Protopopov, V.O. Podanov // *Chebyshevskii sbornik*. 2022. Vol. 23. No. 3. Pp. 178–193.
18. Ageev E.V. Numerical optimization of the charge production process by electrodispersion of T5K10 alloy waste / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, A.E. Gvozdev, A.A. Kalinin // *Chebyshevskii sbornik*. 2022. Vol. 23. No. 1. Pp. 183–195.
19. Агеев Е.В., Агеева А.Е. Состав, структура и свойства твердосплавных порошков, полученных электродиспергированием сплава Т5К10 в воде // *Металлург*. 2022. №2. С. 39-43.
20. Агеев Е.В., Кругляков О.В., Поданов В.О. Размерные характеристики порошков, полученных электродиспергированием сплава ЖС6У в керосине // *Вестник ВолгГТУ*. 2022. №7 (266). С. 62-66.

## References

1. Patrushev A. Y., Farafonov D. P., Serov M. M. Bezvol'framovye tverdye splavy: metody polucheniya, struktura i svoistva (obzor) [Tungsten-free hard alloys: methods of preparation, structure and properties (review)]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2021, no. 11(105), pp. 66-81.
2. Akimov V. V., Badamshin A.M., Nesov S. N. [et al.] Izmenenie strukturno-fazovogo sostoyaniya i fiziko-khimicheskikh svoistv bezvol'framovykh tverdykh splavov TiC-TiNi posle razlichnykh vidov ionno-luchevoi obrabotki [Changes in the structural and phase state and physico-chemical properties of tungsten-free hard alloys TiC-TiNi after various types of ion-beam treatment]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 2(176), pp. 5-9.
3. Panov V.S. Bezvol'framovye tverdye splavy: analiticheskii obzor [Tungsten-free hard alloys: an analytical review]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2019, no. 10, pp. 33-39.
4. Panov V.S., Nitkin N.M. Bezvol'framovye tverdye splavy [Tungsten-free hard alloys]. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nanotechnology: science and production*, 2017, no. 3, pp. 65-70.
5. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Material balance of the process of electroerosive dispersion of waste of tungsten-free hard alloys of the KNT16 brand in distilled water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 8-19.
6. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Rentgenospektral'nyi mikroanaliz elektroerozionnogo poroshkovogo materiala, poluchennogo v srede etilovogo spirta iz otkhodov bezvol'framovogo tverdogo splava marki KNT16 [X-ray spectral microanalysis of an electroerosive powder material obtained in an ethyl alcohol medium from waste of a tungsten-free hard alloy of the KNT16 brand]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestiya Volgograd State Technical University*, 2020, no. 7 (242), pp. 33-36.
7. Loktionova O.G., Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Results of X-ray studies of sintered samples obtained from electroerosive powder material of the KNT16 alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 22-34.
8. Badamshin A.M., Nesov S.N., Kovivchak V.S., Povoroznyuk S.N., Akimov V.V. Vliyanie ionnogo oblucheniya na morfologiyu, elementnyi i khimicheskii sostav poverkhnostnykh sloev bezvol'framovykh tverdykh splavov [The effect of ion irradiation on the morphology, elemental and chemical composition of surface layers of tungsten-free hard alloys]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Letters to the Journal of Technical Physics*, 2021, vol. 47, no. 15, pp. 19-22.
9. Ageeva E.V., Sabelnikov B.N. Struktura i svoistva bezvol'framovogo tverdogo splava na osnove karbonitrida titana, spechennogo iz elektroerozionnykh poroshkov, poluchennykh v uglerodsoderzhashchei srede [Structure and properties of a tungsten-free hard alloy based

on titanium carbonitride sintered from electroerosive powders obtained in a carbon-containing medium]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*, 2021, no. 4, pp. 158-162.

10. Ageeva E.V., Loktionova O.G., Sabelnikov B.N. Comparative Analysis of the Process of Obtaining a Charge for a Tungsten-Free CST Hard Alloy by Means of Electroerosive Dispersion in Carbon- and oxygen-containing Working Fluids. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2021;11(1):21-35 (In Russ.).

11. Ageev E.V., Ageeva A.E. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water. *Metallurgist*, 2022, vol. 66, no. 1-2, pp. 146-154.

12. Ageev E.V., Ageeva A. E. Struktura i svoistva poroshkov, poluchennykh v usloviyakh elektroerozionnoi metallurgii otkhodov tverdogo splava T5K10 v kislorod- i uglerod-soderzhashchikh sredakh [Structure and properties of powders, solid alloy T5K10 wastes obtained in the conditions of electroerosive metallurgy in oxygen- and carbon-containing media]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*, 2022, no.9 (213), pp. 387-392.

13. Ageev E.V., Pykhtin A.I., Novikov E.P., Ageeva A.E. Parametric Parameters of the Shape of Electrocorundum Particles Obtained by Electrodispersing Waste Electrical Aluminum Grade AD0E. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2022;12(4):40-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-440-53>

14. Ageev E.V., Podanov V.O., Ageeva A.E. Optimizatsiya protsessa izgotovleniya zharoprochnogo nikelovogo splava putem iskrovogo plazmennogo spekaniya poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergированием otkhodov ZhS6U v vode [Optimization of the manufacturing process of a heat-resistant nickel alloy by spark plasma sintering of powders obtained by electroerosive dispersion of waste ZHS6U in water]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening Technologies and Coatings*, 2023, no. 4, pp. 170-174.

15. Ageev E.V., Serebrovsky V.I., Podanov V.O., Ageeva A.E. Investigation of the Influence of the Dispersion Medium on the Properties of Heat-resistant Powders Obtained from the Waste of the Alloy ZHSU6. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2022;12(3):39-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-39-56>.

16. Ageev E.V., Gvozdev A.E., Protopopov E.A., Podanov V.O., Ageeva A.E. Dimensional analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U in water. *Chebyshevskii sbornik*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 197–207.

17. Ageev E.V., Ageeva E.V., Gvozdev A.E., Protopopov E.A., Podanov V.O. Mathematical optimization of the average particle size of powders obtained by electroerosive dispersion of heat-resistant nickel alloy ZHS6U. *Chebyshevskii sbornik*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 178–193.

18. Ageev E.V., Ageeva E.V., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. Numerical optimization of the charge production process by electrodispersion of T5K10 alloy waste. *Chebyshevskii sbornik*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 183-195.

19. Ageev E.V., Ageeva A.E. Sostav, struktura i svoistva tverdosplavnykh poroshkov, poluchennykh elektrodyspergirovaniem splava T5K10 v vode [Composition, structure and properties of carbide powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water]. *Metal-lurg*, 2022, no.2, pp. 39-43.

20. Ageev E.V., Kruglyakov O.V., Podanov V.O. Razmernye kharakteristiki poroshkov, poluchennykh elektrodyspergirovaniem splava ZhS6U v kerosine [Dimensional characteristics of powders obtained by electrodispersion of the ZHS6U alloy in kerosene]. *Vestnik VolgGTU = Vestnik VolgSTU*, 2022, no.7 (266), pp. 62-66.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Агеева Екатерина Владимировна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>

**Хорьякова Наталья Михайловна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: natali030119891@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0980-1974>

**Сабельников Борис Николаевич**, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-699X>

**Агеева Анна Евгеньевна**, студентка, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru, SPIN-код: 6687-3804

**Ekaterina V. Ageeva**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Technology of Materials and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>

**Natalia M. Horiakova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Materials and Transport Technology Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: natali030119891@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0980-1974>

**Boris N. Sabelnikov**, Senior Lecturer, Industrial and Civil Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-699X>

**Anna E. Ageeva**, Student of the Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageevaanna2004@yandex.ru, SPIN-код: 6687-3804

## Среднегодовые температуры воды в тепловых сетях криолитозоны

Д.Н. Китаев<sup>1</sup> ✉, А.Р. Бохан<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет  
ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: dkitaev@cchgeu.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Для населенных пунктов, расположенных в криолитозоне на территории РФ, получить значения среднегодовых температур воды в тепловых сетях централизованных систем теплоснабжения отдельно для подающей и обратной магистрали при использовании проектных температур воды в диапазоне от 95 до 150°C с учетом современных климатических данных и показателей используемых отопительных приборов.

**Методы.** Для достижения поставленных целей использовались методы центрального качественного регулирования нагрузки потребителя тепловой энергии, основанные на уравнении теплового баланса. Для нахождения температур в точке излома температурного графика использовались численные методы решения уравнений. Для получения уравнения зависимости среднегодовой температуры воды в подающей магистрали тепловой сети использовались методы теории приближения функций алгебраическими полиномами. Для кластеризации населенных пунктов по критерию нахождения в криолитозоне и возможности использования централизованного теплоснабжения использовались методы анализа и синтеза.

**Результаты.** Получены среднегодовые значения температур воды для подающей и обратной магистралей тепловых сетей при использовании графиков центрального качественного регулирования с проектными температурами от 95 до 150°C с учетом значений среднемесячных наружных температур воздуха для населенных пунктов криолитозоны Российской Федерации.

**Заключение.** Рекомендуемые современными нормативами значения годовых температур воды для подающей магистрали тепловых сетей могут существенно отличаться от расчетных значений, полученных с учетом проектных температур воды, климатических характеристик района проектирования, особенностей организации закрытой системы теплоснабжения с целью обеспечения нормативных температур горячего водоснабжения. Получено квадратное уравнение, позволяющее с высокой точностью рассчитать проектную годовую температуру теплоносителя для подающего трубопровода в зависимости от реализуемого в системе теплоснабжения температурного графика для населенных пунктов, расположенных на территории криолитозоны.

**Ключевые слова:** теплоснабжение; криолитозона; тепловые сети; качественное регулирование; температура теплоносителя.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Китаев Д.Н., Бохан А.Р. Среднегодовые температуры воды в тепловых сетях криолитозоны // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 44-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-44-56>.

Поступила в редакцию 03.02.2024

Подписана в печать 05.03.2024

Опубликована 27.03.2024

## Average Annual Water Temperatures in Heating Networks Cryolithozones

Dmitry N. Kitaev <sup>1</sup> ✉, Anna R. Bohan <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University,  
84, 20 Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: dkitaev@cchgeu.ru

### Abstract

**Purpose of research.** For settlements located in the permafrost zone on the territory of the Russian Federation, obtain the values of average annual water temperatures in heating networks of centralized heating systems separately for the supply and return mains using design water temperatures in the range from 95 to 150 °C, taking into account modern climatic data and the indicators of the heating systems used devices.

**Methods.** To achieve the set goals, methods of central high-quality regulation of the load of the thermal energy consumer were used, based on the heat balance equation. To find the temperatures at the break point of the temperature graph, numerical methods for solving equations were used. To obtain an equation for the dependence of the average annual water temperature in the supply main of the heating network, methods of the theory of approximation of functions by algebraic polynomials were used. To cluster settlements according to the criterion of being in the permafrost zone and the possibility of using centralized heat supply, methods of analysis and synthesis were used.

**Results.** Average annual water temperatures for the supply and return lines of heating networks were obtained using central quality control schedules with design temperatures from 95 to 150°C, taking into account the values of average monthly outdoor air temperatures for settlements in the permafrost zone of the Russian Federation.

**Conclusion.** The values of annual water temperatures recommended by modern standards for the supply main of heating networks may differ significantly from the calculated values obtained taking into account the design water temperatures, climatic characteristics of the design area, and features of the organization of a closed heat supply system in order to ensure standard hot water supply temperatures. A quadratic equation has been obtained that makes it possible to calculate with high accuracy the design annual temperature of the coolant for the supply pipeline depending on the temperature schedule implemented in the heat supply system for settlements located in the permafrost zone.

**Keywords:** heat supply; cryolithozone; heating networks; quality regulation; coolant temperature.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Kitaev D.N., Bohan A. R. Average Annual Water Temperatures in Heating Networks Cryolithozones. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 44-56 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-44-56>.

Received 03.02.2024

Accepted 05.03.2024

Published 27.03.2024

## Введение

Развитие арктической зоны является важным аспектом экономической и стратегической безопасности РФ. Повышение качества жизни на данной территории является неотъемлемой целью государственной политики, закрепленной в указе президента РФ [1, 2]. Существующее состояние объектов жилищно-коммунальной инфраструктуры городов, расположенных на арктической территории в значительной степени не удовлетворяет современным требованиям, а результатом этого является снижение темпов социально-экономического развития. В теплоснабжающих комплексах населенных пунктов арктической зоны большое внимание уделяется реконструкции и модернизации систем теплоснабжения [3, 4], что особенно актуально при низких проектных температурах наружного воздуха [5, 6]. В значительной части крупных северных городов используются централизованные системы теплоснабжения различной мощности. Необходимым при реконструкции систем теплоснабжения является обеспечение инженерных решений, соответствующих нормативам проектирования и учитывающих особенности климата рассматриваемых территорий [7, 8]. Важным вопросом является проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [9-11], влияющих на технико-экономические показатели теплоснабжающих и тепло-

сетевых организаций [12, 13]. При ее расчете в качестве исходных данных часто пользуются рекомендуемыми значениями, не учитывающими климатические характеристики местности и особенности функционирования закрытых двухтрубных систем теплоснабжения с преобладающей отопительной нагрузкой, что особенно актуально для районов полярного региона [14, 15]. Как считают некоторые исследователи, такой подход может способствовать ошибкам проектирования [16-18].

В соответствии с действующими рекомендациями по проектированию тепловых сетей, при расчете тепловой изоляции температуры воды принимаются отдельно для подающих и обратных трубопроводов как среднегодовые и имеют различные значения. Рекомендуемые значения температуры теплоносителя в последней редакции свода правил были скорректированы по сравнению с предыдущей 2012 г. В настоящее время для подающего трубопровода при качественном регулировании для проектных температурных графиков 95, 105, 115, 130, 150, 180°C, рекомендуемые температуры воды за год составляют 65, 70, 75, 85, 90, 110°C соответственно. В предыдущих рекомендациях отсутствовали значения для 105 и 115°C, а также для температурных графиков 95 и 130°C были отличные значения, составляющие 55 и 65°C соответственно. В ряде современных рекомендаций в части расчета тепловой изо-

ляции трубопроводов также наблюдаются несоответствия. Например, ГОСТ 30732-2020 содержит рекомендации для двух температурных графиков с проектными значениями 95 и 150 °С, а свод правил по проектированию изоляции оборудования и трубопроводов рассматривает три значения годовой температуры для 95, 150 и 180 °С, совпадающие с СП по тепловым сетям. В современной нормативной литературе односторонне трактовка принята значения среднегодовой температуры воды для обратных трубопроводов водяных сетей, составляющая 50 °С. Ввиду специфики регулирования централизованных тепловых сетей по температуре наружного воздуха и применения уравнений на основе теплового баланса транспортируемой, поступившей в систему отопления, отданной отопительными приборами энергии и теплопотерь здания, годовые значения температур воды в сети должны зависеть от климатических характеристик района проектирования [19-21]. Учет подобных факторов будет способствовать повышению точности инженерных расчетов и их качеству.

### Материалы и методы

Для определения значений температур теплоносителя в водяных тепловых сетях в течение календарного года, использовались рекомендации приказа министерства энергетики РФ от 30.12.2008 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя». Искомое значение годовой

температуры определялось нахождением средневзвешенного значения по средним температурам воды в трубопроводе за каждый месяц года, определенных по соответствующему значению среднемесячной температуры наружного воздуха, с учетом продолжительности работы сети. Общая формула имеет вид

$$\tau_{\text{год}} = \frac{\sum_i^{12} (\tau_{ji} n_i)}{n_3 + n_d}, \quad (1)$$

где  $\tau_{ji}$  – температура теплоносителя в  $j$ -й магистрали (подающая или обратная) сети при средней температуре наружного воздуха соответствующего  $i$ -го месяца года, °С;  $n_i$  – продолжительность работы сети в  $i$ -м месяце;  $n_3, n_d$  – продолжительность отопительного и неотопительного периода, соответственно.

На основе уравнения качественного регулирования, значение температуры теплоносителя в трубопроводе  $\tau_{ji}$  ( $j=1$  для подающего и  $j=2$  для обратного трубопровода), при произвольной температуре наружного воздуха  $t_i$  определяется по известным отношениям с учетом преобладающего современного значения показателя  $n$ , учитывающего конкретный тип устанавливаемых отопительных приборов и схему подключения [11,12], с учетом средней температуры в отапливаемых помещениях  $t_b$ , имеет вид

$$\tau_{ji} = t_b + (\tau_{o.n} - t_b) \left( \frac{t_b - t_i}{t_b - t_0} \right)^{\frac{1}{1+n}} + (\tau_{j0} - \tau_{o.n}) \left( \frac{t_b - t_i}{t_b - t_0} \right), \quad (2)$$

где  $t_i$  – произвольная температура наружного воздуха, °C;  $t_0$  – расчетная температура для проектирования отопления, °C;  $\tau_{j0}$  – температура воды в  $j$ -й магистрали при  $t_0$ , °C;  $\tau_{o.п}$  – средняя температура воды в отопительном приборе, °C.

Климатические параметры принимались по последней редакции СП строительная климатология. При проведении расчетов учитывалась круглогодичная работа тепловой сети. Температура воды в неотапительный период в подающей магистрали принималась 70°C с целью обеспечения нормативных температур горячего водоснабжения у потребителей. В обратной магистрали рассматривалось два значения в неотапительном периоде  $\tau_{2ноп} = 50$  и 55°C. В процессе расчета численным решением уравнения (2) находилось значение температуры наружного воздуха при температуре воды 70°C.

Расчеты проводились для населенных пунктов, расположенных в криоли-

тозоне. Был проведен анализ последней версии СП по строительной климатологии по отнесению населенных пунктов, указанных в нормативе, к территории криолитозоны. После чего из выборки были исключены населенные пункты с количеством населения менее 1000 человек, с временным проживанием людей, упраздненные на момент исследования. В итоге количество населенных пунктов составило 91. Для каждого населенного пункта были определены среднегодовые температуры теплоносителя для проектных температур воды в тепловой сети от 95 до 150 °C с шагом в 5°C.

### Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты расчетов значений годовых температур воды в подающей магистрали сети  $\tau_{1год}$  по каждой проектной температуре  $\tau_{10}$ , °C, максимальные  $\tau_{1год(макс)}$  и минимальные  $\tau_{1год(мин)}$  значения, разница  $\Delta = \tau_{1год(макс)} - \tau_{1год(мин)}$ .

**Таблица 1.** Проектные значения температур воды для подающей магистрали

**Table 1.** Design values of water temperatures for the supply line

$\tau_{10}$ , °C/ $\tau_{10}$ , °C	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$\Delta$ , °C/ $\Delta$ , °C	3,83	5,15	6,27	7,23	8,12	8,92	9,51	9,99	10,66	11,32	11,98	12,64
$\tau_{1год(макс)}$ , °C/ $\tau_{1year(max)}$ ,	73,83	75,34	76,95	78,56	80,17	81,78	83,39	85,00	86,79	88,58	90,42	92,37
$\tau_{1год(мин)}$ , °C/ $\tau_{1year(min)}$ ,	70,00	70,19	70,68	71,33	72,05	72,86	73,88	75,01	76,13	77,26	78,44	79,73
$\tau_{1год}$ , °C/ $\tau_{1year}$ , °C	71,74	72,77	73,91	75,15	76,49	77,88	79,30	80,74	82,22	83,72	85,25	86,82

Для обратной магистрали получили следующие результаты: при  $\tau_{2\text{ноп}} = 50^\circ\text{C}$ ,  $\Delta = 5,24^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{2\text{год(мин)}} = 46,15^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{2\text{год(макс)}} = 51,39^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{2\text{год}} = 49,22^\circ\text{C}$ ; при  $\tau_{2\text{ноп}} = 55^\circ\text{C}$ ,  $\Delta = 6,11^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{2\text{год(мин)}} = 47,25^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{2\text{год(макс)}} = 53,36^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{2\text{год}} = 50,54^\circ\text{C}$ .

На рис.1 представлены результаты расчетов годовых температур воды для обратной магистрали сети. Расчеты проводились для двух значений средних температур неотапительного периода  $55^\circ\text{C}$  (синий цвет) и  $50^\circ\text{C}$  (зеленый цвет). Представлены также средние значения температур (см. рис.1).

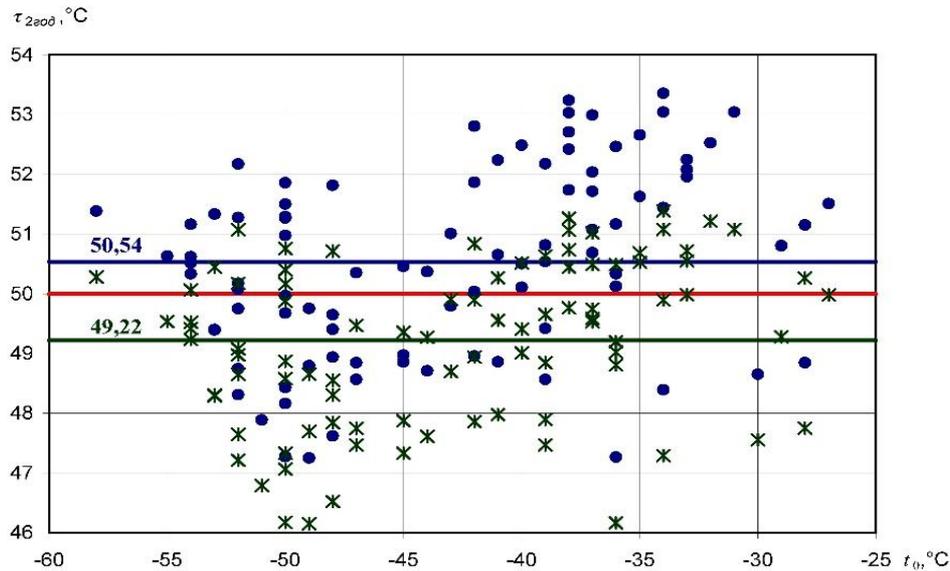


Рис. 1. Температуры воды в обратной магистрали

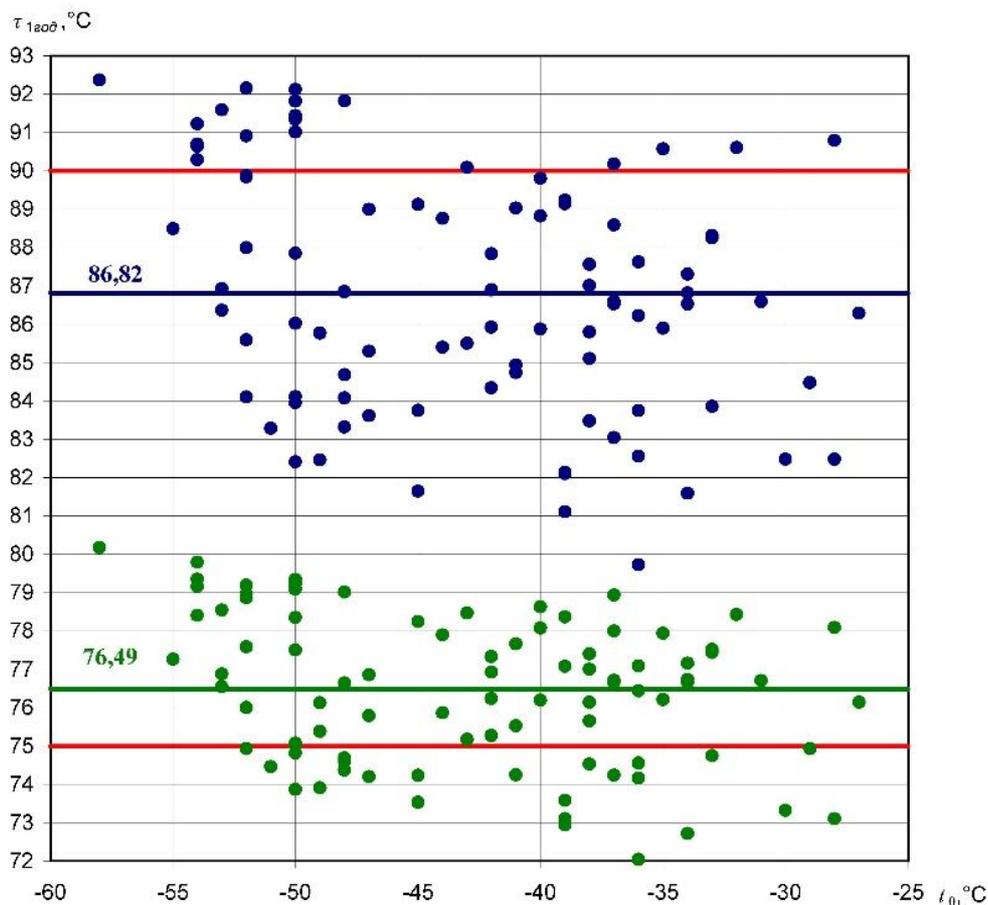
Fig. 1. Return water temperatures

Как показывают результаты расчетов (см. рис. 1), среднегодовые температуры в обратной магистрали тепловой сети в принятых условиях практически не отличаются от рекомендуемых нормативами в  $50^\circ\text{C}$  и разницу в  $0,54$  и  $0,78^\circ\text{C}$  нельзя назвать существенной. Тем не менее, разница между минимальным и максимальным значением в  $5,24$  и  $6,11^\circ\text{C}$  уже значительна, и способна повлиять на толщину изоляции при расчете.

На рис. 2 представлены значения годовых температур воды в подающей магистрали тепловой сети для проектных температур  $150^\circ\text{C}$  (синий цвет) и

$115^\circ\text{C}$  (зеленый цвет). На рис.2 представлены также осредненные значения температур. Красными линиями обозначены рекомендуемые нормативами значения для соответствующих температурных графиков.

Результаты расчетов (табл.1) и данные рис. 2 демонстрируют отличие рекомендуемых нормативами и полученных расчетами данных. Наблюдается тенденция увеличения разницы между минимальным и максимальным значениями годовой температуры воды для подающей магистрали  $\Delta$ ,  $^\circ\text{C}$  с ростом проектных значений температурного графика.



**Рис. 2.** Температуры воды в подающей магистрали для графиков 150/70 и 115/70

**Fig. 2.** Water temperatures in the supply line for schedules 150/70 and 115/70

Таким образом, для температурного графика 95/70 разница имеет значение  $\Delta=3,83^{\circ}\text{C}$ , для 115/70  $-\Delta=8,12^{\circ}\text{C}$  а для 150/70  $-\Delta=12,64^{\circ}\text{C}$ . Максимальная разница между рекомендуемым нормативами значением среднегодовой температуры воды в сети и расчетным значением составляет  $10,27^{\circ}\text{C}$  при температурном графике 150/70. При температурном графике 115/70 максимальная разница между рекомендуемой и расчетной температурой составляет  $5,17^{\circ}\text{C}$  для поселка городского типа Усть-Нера, расположенного на востоке Якутии. Для этого же населенного пункта и Крест-Хальджай также находящегося в

Якутии, при температурном графике 95/70 разница будет составлять  $8,83^{\circ}\text{C}$ . Отсюда следует необходимость учета конкретных климатических условий местности для проектирования изоляции тепловых сетей.

На рис. 3 представлено сравнение полученных расчетных данных (синяя линия) и значений, рекомендуемых различными нормативами. Из рис. 3 следует, что расчетные значения и рекомендуемые различными нормативами совпадают (пересекаются) только в двух точках, которым соответствуют значения  $\tau_{\text{год}} = 77,55^{\circ}\text{C}$  при  $\tau_{10} = 118,82^{\circ}\text{C}$  и  $\tau_{\text{год}} = 80,3^{\circ}\text{C}$  при  $\tau_{10} = 128,7^{\circ}\text{C}$ .

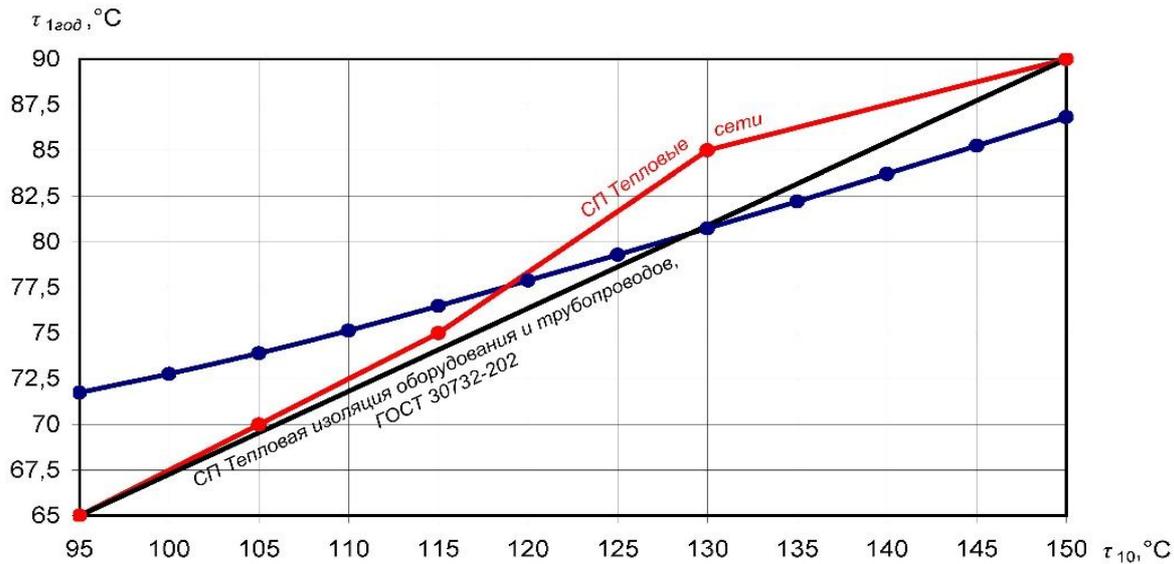


Рис. 3. Сравнение расчетных и рекомендуемых значений

Fig. 3. Comparison of calculated and recommended values

Наибольшая разница наблюдается при проектной температуре  $95^{\circ}\text{C}$  и имеет значение  $6,74^{\circ}\text{C}$ , при  $105$  –  $3,91^{\circ}\text{C}$ , а при  $150$  –  $3,18^{\circ}\text{C}$ . В области низких проектных температур воды, расчетные значения ниже рекомендуемых, а в области высоких – наоборот. Отсюда следует, что расчетная толщина изоляции в первом интервале будет получаться меньше, а во втором больше по сравнению с рекомендуемыми нормативами.

Получено уравнение, позволяющее со средним значением относительной ошибки  $0,065\%$  рассчитать среднегодовую температуру теплоносителя в подающей магистрали тепловой сети в зависимости от проектной температуры, имеющее вид

$$\tau_{\text{год}} = 0,000925\tau_{10}^2 + 0,050639\tau_{10} + 58,48. \quad (3)$$

## Выводы

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие вы-

воды. Среднегодовые температуры воды в обратной магистрали тепловой сети в принятых условиях незначительно отличаются от рекомендуемых нормативами в  $50^{\circ}\text{C}$ , но для точных расчетов рекомендуется учитывать климатические данные, т.к. для некоторых населенных пунктов ошибка может составлять более  $5^{\circ}\text{C}$ .

Значения годовых температур воды в подающей магистрали тепловой сети, рассчитанные с учетом климатических особенностей арктической местности, могут существенно отличаться от рекомендуемых нормативами, как в большую, так и в меньшую сторону. Установлена тенденция увеличения разницы между максимальными и минимальными значениями расчетной температуры воды при возрастании проектных значений температурного графика от  $95$  до  $150^{\circ}\text{C}$ , составляющие соответственно  $3,83^{\circ}\text{C}$  и  $12,64^{\circ}\text{C}$ .

Полученное квадратное уравнение, позволят с высокой точностью проводить расчеты годовых температур теплоносителя для подающей магистрали

тепловых сетей арктической зоны для температурных графиков с проектными температурами от 95 до 150°C.

### Список литературы

1. Города азиатской арктики в условиях новых вызовов изменений климата и пандемии COVID-19 / А.Н. Пилясов, Н.Ю. Замятина, А.Е. Поляченко, Б.В. Никитин // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2022. №2(115). С. 114-140. DOI:10.26110/ARCTIC.2022.115.2.007.
2. Оценка воздействия опасных криогенных процессов на инженерные объекты в арктике / В.И. Гребенец, Ф.Д. Юров, А.И. Кизяков, Л.И. Зотова, А.А. Маслаков, В.А. Толманов, И.Д. Стрелецкая // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2022. № 3-4 (115-116). С. 87-102. DOI:10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-87-102.
3. Минин В.А. Характеристики источников теплоснабжения городов мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т.10. № 5-18. С. 5-19. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.5-19.
4. Биев А.А., Шпак А.В. Проблема мазутозависимости северного региона: ее особенности и возможные пути разрешения на примере мурманской области // Проблемы развития территории. 2016. №1(81). С. 65-78.
5. Влияние климатических условий на эффективность автоматического регулирования в системах централизованного теплоснабжения / Н.А. Драпалюк, М.С. Кононова, О.О. Андрияшкин, С.В. Божко // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. №1(12). С. 54-61.
6. Кононова М.С., Воробьева Ю.А., А Забара.В. Влияние теплозащитных характеристик тепловой сети на температурный режим системы горячего водоснабжения // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 4(15). С. 48-54.
7. Shan X., Wang P., Lu W. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions // Applied Energy. 2017. Т.203. Pp.686-695. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.081.
8. Influence of the layout of functional zones of cities on the development of heat supply systems / V.N. Mel'kumov, S.N. Kuznetsov, S.G. Tul'skaya, A.A. Chuikina // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2019. №2(42). Pp. 85-92. DOI:10.25987/VSTU.2019.42.2.009.
9. Расчет условий совместной прокладки трубопроводов надземным способом / В.В. Григорьев, П.Е. Захаров, А.С. Кондаков, И.Г. Ларионова // Математические заметки СВФУ. 2017. Т. 24. №3. С. 78-89. DOI 10.25587/SVFU.2018.3.10891.

10. Akhmetova I., Chichirova N., Derevianko O. Revisiting heat losses calculation at district heating network // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. Т.8. №12. Pp 694-702.

11. Version of the solution of the problem of optimization of thickness of the heat-insulation layer in heat supply / N.A. Petrikeeve, D.M. Chudinov, Ye.A. Kopytina, O.A. Sotnikova // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2018. №4(40). Pp. 40-49.

12. Жутаева Е.Н., Давыдова Т.Е., Дубровская Т.Н. Оптимизация затрат предприятия (на примере исследования рынка теплоснабжения) // *ФЭС: Финансы. Экономика*. 2017. №5. С. 29-38.

13. Китаев Д.Н., Тульская С.Г., Мартыненко Г.Н. Влияние проектных среднегодовых значений температур воды в тепловой сети на стоимость изоляции // *ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия*. 2022. Т. 19. №6. С. 53-57.

14. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport / V. Melkumov, S. Tulskaaya, A. Chuykina, V. Dubanin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Т. 1258. Pp 3-10. DOI:10.1007/978-3-030-57450-5\_1.

15. Рафальская Т.А. Низкотемпературные режимы работы тепловых сетей при качественно - количественном регулировании // *Новая наука: Теоретический и практический взгляд*. 2016. №10(2). С. 141-143.

16. Воеводин А.Г. Анализ расчетов нормативных значений технологических потерь при передаче тепловой энергии по сетям систем теплоснабжения потребителей с целью снижения эксплуатационных затрат // *Транспортные системы*. 2016. №2. С.31-41. DOI:10.46960/62045\_2016\_2\_31.

17. Басс М.С., Середкин А.А., Батухтин С.Г. Проблемы нормирования тепловых потерь в водяных тепловых сетях и котельных // *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. XVIII Международная научно-практическая конференция / отв. ред. А. В. Шапиева*. Чита, 2018. С. 57-61.

18. Бадах В.Ф., Кузнецова А.Д. Расчет нормативных потерь тепла через изоляцию трубопроводов тепловых сетей // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2011. №4(18). С. 60-72.

19. Панферов В.И., Панферов С.В. Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2016. Т. 16. №1. С. 21-30. DOI: 10.14529/ctcr160102.

20. Китаев Д.Н., Мартыненко Г.Н., Лобода А.В. Уравнения характерных значений температурных графиков // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2019. №3(55). С. 21-27. DOI 10.25987/VSTU.2019.55.3.002.

21. Смородова О.В., Китаев С.В., Усеев Н.Ф. Сравнительный анализ методов регулирования теплоснабжения // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2018. №17-1. С. 54-58.

## References

1. Pilyasov A.N. Goroda aziatskoj arktiki v usloviyah novykh vyzovov izmenenij klimata i pandemii COVID-19 [Cities of the Asian Arctic in the context of new challenges of climate change and the covid-19 pandemic]. *Nauchnyj vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga = Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug*, 2022, no. 2(115), pp. 114-140. doi:10.26110/arctic.2022.115.2.007.
2. Grebenets V.I. et al. Ocenka vozdejstviya opasnykh kriogennykh processov na inzhenernye ob"ekty v arktike [Assessment of the impact of hazardous cryogenic processes on engineering objects in the Arctic]. *Vestnik Rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovanij = Bulletin of the Russian Foundation for Basic Research*, 2022, no. 3-4 (115-116), pp. 87-102. doi:10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-87-102.
3. Minin V.A. Harakteristiki istochnikov teplosnabzheniya gorodov murmanskoy oblasti [Characteristics of heat supply sources for cities in the Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 10, no. 5-18, pp. 5-19. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.5-19.
4. Biev A.A. Shpak A.V. Problema mazutozavisimosti severnogo regiona: ee osobennosti i vozmozhnye puti razresheniya na primere murmanskoy oblasti [The problem of fuel oil dependence of the northern region: its features and possible solutions using the example of the Murmansk region]. *Problemy razvitiya territorii = Problems of Territory Development*, 2016, no. 1(81), pp. 65-78.
5. Drapalyuk N.A., Kononova M.S., Andriyashkin O.O., Bozhko S.V. Vliyanie klimaticheskikh uslovij na effektivnost' avtomaticheskogo regulirovaniya v sistemah centralizovanogo teplosnabzheniya [The influence of climatic conditions on the efficiency of automatic regulation in centralized heating systems]. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and Communal Infrastructure*, 2020, no. 1(12), pp. 54-61.
6. Kononova M.S., Vorobyova Yu.A., Zabara A.V. Vliyanie teplozashchitnykh harakteristik teplovoj seti na temperaturnyj rezhim sistemy goryachego vodosnabzheniya [The influence of heat-protective characteristics of a heating network on the temperature regime of a hot water supply system]. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and Communal Infrastructure*, 2020, no. 4(15), pp. 48-54.
7. Shan X., Wang P., Lu W. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions. *Applied Energy*, 2017, vol. 203, pp. 686-695. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.081.
8. Mel'kumov V.N., Kuznetsov S.N., Tul'skaya S.G., Chuikina A.A. Influence of the layout of functional zones of cities on the development of heat supply systems. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2019, no 2(42), pp. 85-92. doi:10.25987/VSTU.2019.42.2.009.

9. Grigoriev V.V., Zakharov P.E., Kondakov A.S., Larionova I.G. Raschet uslovij sovmestnoj prokladki truboprovodov nadzemnym sposobom [Calculation of conditions for joint laying of pipelines by overhead method]. *Matematicheskie zametki SVFU = Mathematical Notes of NEFU*, 2017, vol. 24, no 3, pp. 78-89. doi 10.25587/SVFU.2018.3.10891.
10. Akhmetova I., Chichirova N., Derevianko O. Revisiting heat losses calculation at district heating network. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, vol.8, no. 12, pp. 694-702.
11. Petrikeeveva N.A., Chudinov D.M., Kopytina Ye.A., Sotnikova O.A. Version of the solution of the problem of optimization of thickness of the heat-insulation layer in heat supply. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2018, no. 4(40), pp. 40-49.
12. Zhutaeva E.N., Davydova T.E., Dubrovskaya T.N. Optimizaciya zatrat predpriyatiya (na primere issledovaniya rynka teplosnabzheniya) [Optimization of enterprise costs (based on the example of heat supply market research)]. *FES: Finansy. Ekonomika = FES: Finance. Economy*, 2017, no. 5, pp. 29-38.
13. Kitaev D.N., Tulskeya S.G., Martynenko G.N. Vliyanie proektnykh srednegodovykh znachenij temperatur vody v teplovoj seti na stoimost' izolyacii [The influence of the design average annual values of water temperatures in the heating network on the cost of insulation]. *FES: Finansy. Ekonomika. Strategiya = FES: Finance. Economy. Strategy*, 2022, vol. 19, no. 6, pp. 53-57.
14. Melkumov V., Tulskeya S., Chuykina A., Dubanin V. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258. pp. 3-10. doi:10.1007/978-3-030-57450-5\_1.
15. Rafalskaya T.A. Nizkotemperaturnye rezhimy raboty teplovykh setej pri kachestvenno - kolichestvennom regulirovanii [Low-temperature operating modes of heating networks with qualitative and quantitative regulation]. *Novaya nauka: Teoreticheskij i prakticheskij vzglyad = New science: Theoretical and practical view*, 2016, no. 10(2), pp. 141-143.
16. Voevodin A.G. Analiz raschetov normativnykh znachenij tekhnologicheskikh poter' pri peredache teplovoj energii po setyam sistem teplosnabzheniya potrebitel'ej s cel'yu snizheniya ekspluatacionnykh zatrat [Analysis of calculations of standard values of technological losses during the transfer of thermal energy through networks of heat supply systems for consumers in order to reduce operating costs]. *Transportnye sistemy = Transport Systems*, 2016, no. 2, pp.31-41. doi:10.46960/62045\_2016\_2\_31.
17. Bass M.S., Seredkin A.A., Batukhtin S.G. [Problems of standardization of heat losses in water heating networks and boiler houses]. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh processov. XVIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya* [Kulagin readings: equipment and technologies of production processes. XVIII International Scientific and Practical Conference], ed. by A. V. Shapieva. Chita, 2018, pp. 57-61 (In Russ.).

18. Badakh V.F., Kuznetsova A.D. Raschet normativnykh poter' tepla cherez izolyaciyu truboprovodov teplovykh setej [Calculation of standard heat losses through insulation of pipelines of heating networks]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa = Technical and Technological Problems of Service*, 2011, no. 4(18), pp.60-72.

19. Panferov V.I., Panferov S.V. Ob osobennostyah vyvoda uravnenij regulirovaniya sistem centralizovannogo teplosnabzheniya [On the features of deriving equations for regulating centralized heating systems]. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 21-30. doi: 10.14529/ctcr160102.

20. Kitaev D.N., Martynenko G.N., Loboda A.V. Uravneniya harakternykh znachenij temperaturnykh grafikov [Equations of characteristic values of temperature graphs]. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2019, no. 3(55), pp. 21-27. doi 10.25987/VSTU.2019.55.3.002.

21. Smorodova O.V., Kitaev S.V., Useev N.F. Sravnitel'nyj analiz metodov regulirovaniya teplosnabzheniya [Comparative analysis of heat supply regulation methods]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2018, no. 17-1, pp. 54-58.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Китаев Дмитрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: dkitaev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4148-1261>

**Dmitry N. Kitaev**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dkitaev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4148-1261>

**Бохан Анна Руслановна**, аспирант кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: abohan@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2128-6209>

**Anna R. Bokhan**, Post-Graduate Student, Heat and Gas Supply and Oil and Gas Engineering Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: abohan@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2128-6209>

## Амплитудно-частотное смещение, влияющее на точность измерений лага скорости

П.С. Евсюков<sup>1</sup>, О.Н. Андреева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский институт «Курс»  
ул. Кирпичная, д. 34а, г. Москва 105187, Российская Федерация

✉ e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

### Резюме

**Целью работы** является разработка математической модели для исследования влияния амплитудно-частотного смещения на коэффициент поглощения при использовании лагов скорости с Доплеровским эффектом, различных параметров, таких как размер апертуры, коэффициент поглощения, высота и угол направленности.

**Методы.** В данной работе были использованы методы для моделирования смещения амплитудно-частотного сигнала с эффектом Доплера: 1) метод анализа спектра сигналов: используется для изучения частотных характеристик сигналов, включая определение частоты, амплитуды и других параметров; 2) метод численного моделирования: включает в себя использование численных алгоритмов и компьютерных программ например Matlab/Simulink, для моделирования физических явлений, связанных с эффектом Доплера и поглощением; 3) метод обработки сигналов во временной и частотной областях: включает в себя различные техники фильтрации, декомпозиции сигналов и анализа их характеристик во времени и частоте, помогают выявить особенности сигналов; 4) метод математического моделирования: включает в себя разработку математических моделей, описывающих движение объектов и их взаимодействие с окружающей средой.

**Результаты.** В ходе исследования была разработана математическая модель которая исследует влияние различных параметров на амплитудно-частотное смещение в активной акустической системе. Моделирование показало, как размер апертуры, угол наклона, коэффициента поглощения и донное отдаление имеют значительное влияние, а также выявило линейную зависимость между коэффициентами ошибок влияющих на смещение.

**Заключение.** Исследования показали, что амплитудно-частотное смещение оказывает значительное влияние на точность измерений в системе Доплеровского лага. Фазированные массивные приборы демонстрировали преимущества в рамках длительной точности. Сравнение амплитудно-частотного смещения с экспериментальными данными выявило хорошее согласие, что подтверждает адекватность разработанной модели. Однако требуется дополнительное моделирование для проверки влияния других источников ошибок, таких как территориальное, связь боковых лепестков, выравнивание луча и др., и более подробного изучения влияния крена на точность измерений.

**Ключевые слова:** амплитудно-частотное смещение; лаг скорости; эхосигнал; общая доплеровская фаза; эффект Доплера; моделирование; диаграмма направленности.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Евсюков П.С., Андреева О.Н. Амплитудно-частотное смещение, влияющее на точность измерений лага скорости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 57-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-57-70>.

Поступила в редакцию 13.01.2024

Подписана в печать 12.02.2024

Опубликована 27.03.2024

## Amplitude-Frequency Shift Affecting the Accuracy of Velocity Lag Measurements

Petr S. Evsyukov <sup>1</sup> ✉, Olga N. Andreeva <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Central Research Institute «Kurs»  
34a Kirpichnaya str., Moscow 105187, Russian Federation

✉ e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research** of this work is to develop a mathematical model to study the effect of amplitude-frequency offset on the absorption coefficient when using velocity lags with Doppler effect, different parameters such as aperture size, absorption coefficient, height and angle of directivity.

**Methods.** In this work, methods were used to model the amplitude-frequency signal shift with the Doppler effect: 1) Signal spectrum analysis method: used to study the frequency characteristics of signals, including the determination of frequency, amplitude and other parameters. 2) Numerical simulation method: include the use of numerical algorithms and computer programs such as Matlab/Simulink, to simulate the physical phenomena associated with the Doppler effect and absorption. 3) Signal processing method in time and frequency domains: include various techniques for filtering, decomposition of signals and analyzing their characteristics in time and frequency, help to identify the characteristics of signals. 4) Method of mathematical modeling: include the development of mathematical models describing the motion of objects and their interaction with the environment.

**Result.** In this research, a mathematical model was developed to investigate the effect of various parameters on the amplitude-frequency displacement in an active acoustic system. The modeling showed how aperture size, tilt angle, absorption coefficient and bottom distance have a significant effect, and also revealed a linear relationship between the error coefficients affecting the displacement.

**Conclusion.** Amplitude-frequency offset studies showed that this phenomenon has a significant impact on the accuracy of Doppler lag measurements. Phased array instruments showed advantages within the long term accuracy framework. Comparison of the amplitude-frequency offset with experimental data revealed good agreement, which confirms the adequacy of the developed model. However, additional modeling is required to verify the influence of other error sources, such as territorial, side lobe coupling, beam alignment, etc., and to study in more detail the influence of roll on measurement accuracy.

**Keywords:** amplitude-frequency offset; velocity lag; echo; total Doppler phase; Doppler effect; modeling; directional pattern.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Evsyukov P. S., Andreeva O.N. Amplitude-Frequency Shift Affecting the Accuracy of Velocity Lag Measurements. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 57-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-57-70>.

Received 13.01.2024

Accepted 12.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

## Введение

Лаги скорости с использованием эффекта Доплера измеряет относительную скорость между прибором и донным пространством путем передачи акустических импульсов, которые рассеиваются от дна. Затем рассеянный звук принимается и измеряется для определения доплеровского сдвига.

Гидроакустический лаг включает в себя получающее устройство с дешифратором входного сигнала и механизмом выполнения [1].

Важно отметить, что большинство существующих доплеровских лагов [2], по большей части (или всегда, если доступна только одна приемно-передающая антенна), работают в импульсном режиме. Это означает, что длительность приема эхосигнала зависит от глубины под килем объекта. В результате, эхосигнал представлен в виде отрезков независимых реализаций, протяженных во времени, пропорционально времени распространения акустического луча до дна и обратно. Важно учитывать, что это может привести к ситуации, когда интервал приема эхосигнала меньше, чем интервал корреляции случайного процесса с его корреляционной функцией. Этот аспект

требует учета при разработке алгоритмов оценки доплеровского сдвига частоты.

В литературе [3,4] можно найти описания эхосигнала, который анализируется как пространственно-временное случайное поле рассеяния на дне, а затем его отражение представляется в виде частотно-пространственного или частотно-волнового сигнала [5]. Для доплеровского измерителя скорости, работающего с направленным излучением и приемом эхосигнала, применение модели эхосигнала в форме случайного поля, который не добавляет дополнительной информации. Это связано с тем, что пространственные координаты не расширяют базу исходных данных для последующей обработки в алгоритмах, особенно в дальней зоне, когда принимаемое поле представляется как результат воздействия плоской волны на антенну. Следовательно, мы будем рассматривать эхосигнал как временной случайный процесс [6]. Для каждого сигнала определяется трехмерный вектор скорости путем преобразования оцененных радиальных доплеровских смещений акустических лучей в координаты инструмента. Данная технология может применяться в навигации надводных ко-

раблей, подводных лодок, автономных беспилотных аппаратов, а также буксируемых платформ для точного определения скорости либо в сочетании с инерциальной навигационной системой для коррекции дрейфа [7].

Как и при использовании любого другого датчика, качество данных, получаемых от доплеровского измерителя, можно количественно оценить с учетом их точности как в коротких, так и в длительных периодах. Анализ точности измерений скорости имеет важное значение для прогнозирования динамики навигационных ошибок в приложениях, где требуется высокая точность, а также для оптимального использования данных в сочетании с данными о скорости от других датчиков в системах слияния данных, например, с применением фильтров Калмана на основе инерциальной системы [8, 9].

До реализации фильтра Калмана-Бьюси в 1961 году [10], широкое распространение получил метод, предложенный Н. Винером, который обеспечивал оптимальную оценку (с минимальной дисперсией ошибки оценки) измеренного полезного сигнала. Этот метод применялся в случае стационарного случайного процесса среди стационарного случайного шума (ошибки измерения). При этом корреляционные функции и соответствующие спектральные плотности обоих случайных процессов считались известными. В качестве примера такого подхода можно привести работы [11-13], в ко-

торых он применялся для решения задач обработки навигационной информации.

В приложениях, где необходим расчет пути и позиционирование, ошибка скорости может быть описана случайным процессом с нулевой средней дискретной суммой времени. Предполагая независимость краткосрочных ошибок скорости для каждого импульса, стандартное отклонение ошибки позиционирования увеличивается как квадратный корень из количества импульсов. Однако ошибка позиционирования из-за длительной ошибки скорости увеличивается линейно с количеством импульсов. С увеличением количества пингов во времени, длительная ошибка в конечном итоге превышает ошибку позиционирования из-за краткосрочной ошибки [14]. Поэтому важно иметь возможность моделировать и количественно оценивать точность лагов скорости с Доплеровским эффектом.

Метод акустической эмиссии [13] также может применяться в системах измерения скорости совместно с другими эффектами и используется для измерения скорости подводных объектов относительно окружающей среды с использованием доплеровского эффекта. Этот метод может быть полезен для обнаружения и анализа внутренних вибраций или шумов, возникающих в системе измерения скорости в результате ее работы, например, из-за трения внутренних компонентов или движения воды через датчики. Анализ акустической

эмиссии позволяет выявлять аномалии в работе системы и проводить диагностику ее состояния.

### Материалы и методы

Эхосигнал [15], который принимает антенна, формируется как сумма сигналов от отдельных элементарных рассеивателей, которые независимы, случайно распределены и находятся во всех направлениях в пределах ширины диаграммы направленности. Предполагается, что ни один из этих элементарных сигналов не преобладает над остальными по уровню [16], и они обладают случайной начальной фазой и временем возникновения.

Отклонение коэффициента амплитудно-частотного смещения моделируются путем вычисления общей доплеровской фазы с помощью взвешивания ожидаемой доплеровской фазы для каждого угла прихода по диаграмме направленности луча, коэффициентом обратного рассеяния, поглощением и сферическим распространением.

Частотный сдвиг принятого сигнала связан с эффектом Доплера [16]:

$$\omega_d = \omega_{пр} - \omega_{и}, \quad (1)$$

где  $\omega_{пр}$  – частота принятого сигнала;  $\omega_{и}$  – частота излучаемого сигнала. Диаграмма направленности луча рассчитывается с помощью интеграла Рэлея от апертуры и типа системы: поршневой или с фазированной решеткой. Сигналы фазируются таким образом, чтобы обеспечить прием эхо-импульса поперечной волны [17], измеряя радиальную

составляющую скорости в плоском секторе как функцию дальности, азимута и времени [18]. Диаграмма направленности луча рассчитывается как функция сферических координат  $\theta$  и  $\phi$ .

Для вычисления доплеровской фазы используется геометрическая модель, которая учитывает геометрию пути сигнала от источника к приемнику в водной среде. Формула включает в себя три основных компонента: горизонтальное и вертикальное расстояния между источником и приемником (зависящие от угла прихода и глубины), а также горизонтальное расстояние между точками прохождения сигнала через глубину. Это уравнение позволяет учесть как прямой путь сигнала от источника к приемнику, так и путь через глубину, что позволяет получить более точные значения доплеровской фазы с учетом сложной геометрии и характеристик среды.

Точная доплеровская фаза в единицах циклов для заданного угла прихода, заданного  $\theta$  и  $\phi$ , на глубине  $H$  в количестве длин волн определяется следующим образом

$$d_\lambda(\theta, \phi) = 2 \sqrt{H^2 \tan^2(\theta) + H^2 - 2 \sqrt{H^2 \tan^2(\theta) \cos^2(\phi) + H^2}}. \quad (2)$$

Задача заключается в том, чтобы определить разницу расстояний между двумя путями: первый путь идет от точки  $(-1, 0, 0)$  до рассеивателя в точке  $(x_s, y_s, -H)$ , а второй путь – от точки  $(0, 0, 0)$  до того же рассеивателя  $(x_s, y_s, -H)$ . Фактически, доплеровская фаза в циклах вычисляется

ся для данного угла прихода путем перемещения на одну длину волны вдоль оси  $x$ . При больших значениях  $H$  и малых значениях  $\phi$  это уравнение можно приблизить следующим образом:

$$d_\lambda(\theta, \phi) = 2\sin(\theta)\sqrt{1-\sin^2(\phi)}. \quad (3)$$

Это упрощенное уравнение предполагает, что приблизительно  $H$  можно рассматривать как бесконечность, а угол  $\phi$  близок к нулю, что приводит к упрощению формулы.

Весовая функция задается следующим образом

$$w(\theta, \phi) = |W_{\text{tx}}(\theta, \phi)|^2 \cdot |W_{\text{rx}}(\theta, \phi)|^2 \\ S_a(\theta) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot 10^{\frac{2\alpha r}{10}} \cdot \sin(\theta), \quad (4)$$

где  $W_{\text{tx}}(\theta, \phi)$  и  $W_{\text{rx}}(\theta, \phi)$  представляют собой диаграммы направленности передатчика и приемника соответственно;  $S_a(\theta)$  – коэффициент площади рассеяния;  $r$  – расстояние между передатчиком и приемником;  $\alpha$  – коэффициент поглощения в дБ/м. Данное уравнение учитывает различные аспекты, такие как диаграммы направленности лучей, апертурная функция, расстояние действия и коэффициент поглощения, что делает его более полным и точным для описания процессов в системе передачи и приема сигнала.

Далее средняя доплеровская фаза в циклах вычисляется с помощью метода численного интегрирования, используя суммирование по дискретным значениям углов  $\theta$  и  $\phi$ . Этот метод заключается в дискретизации области интегрирова-

ния и вычисления среднего значения функции  $\lambda(\theta, \phi) \cdot w(\theta, \phi)$  деленного на среднее значение только весовой функции  $w(\theta, \phi)$ , где весовая функция  $w(\theta, \phi)$  принимает значение больше нуля.

$$D_\lambda \approx \frac{\sum_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \sum_{\phi=-\max}^{\max} \lambda(\theta, \phi) \cdot w(\theta, \phi)}{\sum_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \sum_{\phi=-\max}^{\max} w(\theta, \phi)}. \quad (5)$$

Если диапазон  $\phi$  ограничен квадрантом, то диапазон  $\theta$  должен быть определен так, чтобы импульс охватывал этот квадрант. В данном случае, когда диапазон  $\phi$  ограничен квадрантом, диапазон  $\theta$  также будет зависеть от ограничений на диапазон  $\phi$ , диапазон можно выбрать в соответствии с условиями, например

$$\theta_{\max} = \arccos\left(\frac{\sqrt{1-\sin^2(\alpha J)}}{\frac{2}{2} \cdot (1 + \frac{PF}{4})}\right), \quad (6)$$

где  $\alpha J$  – угол между продольной осью объекта и линией направления, а  $PF$  – длина импульса в долях диапазона.

Существует пять основных переменных, влияющих поглощающую погрешность: размер апертуры, тип апертуры (поршень или фазированная решетка), угол между двумя направлениями, коэффициент поглощения и высота. Амплитудно-частотное смещение масштабируется со скоростью и будет оценена как функция всех пяти переменных. Оно определяется как относительная ошибка между средней доплеровской фазой и ожидаемой номинальной доплеровской фазой, из-за заданного угла  $\alpha J$ , когда ошибка смещения может быть смоделирована следующим образом:

$$\Delta\lambda_{rel} = \frac{\delta\lambda - 2\sqrt{1-\cos^2(\alpha_j)}}{2\sqrt{1-\cos^2(\alpha_j)}} - \varepsilon tb, \quad (7)$$

где  $\Delta\lambda_{rel}$  – это амплитудно-частотное смещение поглощения, которое выражает отклонение фактической средней доплеровской фазы от ожидаемой номинальной доплеровской фазы;  $\lambda$  – длина волны звукового сигнала, используемого в измерениях;  $eff D$  – эффективный диаметр, который характеризует размер акустической апертуры или антенны, используемой для приема или передачи сигнала,  $\varepsilon tb$  – другие источники ошибок,  $\alpha_j$  – угол, который определяет направление передачи сигнала и направление наблюдения. Формула описывает зависимость смещения поглощения от параметров сигнала (длина волны), характеристик используемого оборудования (эффективный диаметр) и свойств среды распространения (коэффициент поглощения) при различных углах наблюдения.

Интуитивно понятно, что амплитудно - частотное смещение поглощения вызвано неравномерным взвешиванием рассеянной энергии, приходящей под разными углами. Удаленность от датчика до дна обозначена  $r$  при угле возрастания  $\theta - \Delta\theta$ , а при угле  $\theta + \Delta\theta$  дальность равна  $r + \Delta r$ . Следовательно, дальность до дна увеличивается с увеличением угла возрастания. Разница в дальности до дна для разных углов прибытия приводит к не одинаковому взвешиванию доплеровской фазы. Поглощение в дБ пропорционально даль-

ности, поэтому сигналы, приходящие под большими углами возрастания, ослабляются сильнее, чем сигналы, приходящие под меньшими углами возрастания. Интуитивно это должно вызывать отрицательное амплитудное смещение поглощения, поскольку доплеровская фаза меньше при меньших углах возрастания.

Амплитудно - частотное смещение может быть смоделировано следующим образом:

$$\Delta\lambda_{rel} = -\frac{\lambda^2}{D^2} \cdot C \cdot \frac{\alpha}{\cos(\theta)}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $D$  – эффективный диаметр;  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $\theta$  – угол направления;  $C$  – коэффициент, корректирующий результаты измерений.

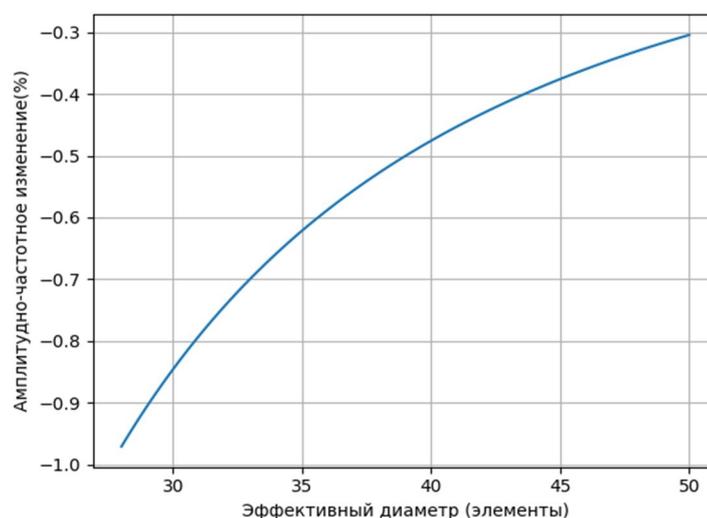
### Результаты и их обсуждение

Первое моделирование было проведено для изучения влияния размера апертуры на амплитудное смещение поглощения. Были смоделированы апертуры с фазированной решеткой для фиксированного угла направления  $30^\circ$ ,  $\alpha = 0,1$  дБ/м и высоты 100 м, результаты показаны на рис. 1. Форма первого члена в (8) была выбрана для моделирования параболы зависимости смещения поглощения от размера апертуры, а константа во втором члене была выбрана для согласования с наклоном параболы.

Следующее моделирование пытается ответить на вопрос, как амплитудное смещение влияет на коэффициент поглощения. Для этого моделирования апертура фиксирована на 40 элементов,

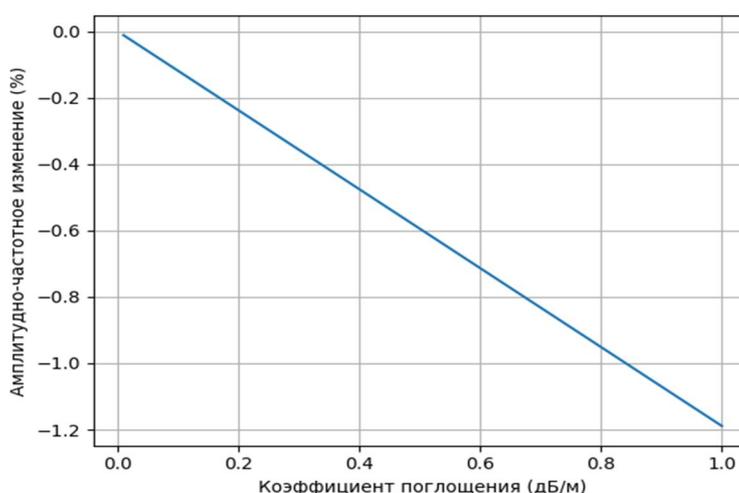
угол направления фиксирован на  $30^\circ$ , а глубина – 100 м. Результаты можно увидеть на рис. 2, существует линейная зависимость между коэффициентом поглощения в дБ/м и смещением поглощения, поскольку коэффициент поглощения приводится в логарифмических единицах. Та же логика может быть и в отношении ошибки наклона рельефа, которая будет обсуждаться в следующих статьях, применима и к этому случаю, когда коэффициент по-

глощения в линейных единицах приблизительно пропорционален коэффициенту в логарифмических единицах в небольшом диапазоне. Как видно, высота над уровнем моря и коэффициент поглощения взаимозаменяемы, как следует из (8), где  $\alpha$  и  $h$  представлены как произведение. Это означает, что любая комбинация этих двух переменных, дающая данное произведение, приводит к такому же смещению поглощения.



**Рис. 1.** Влияние размера апертуры на амплитудно-частотное смещение

**Fig. 1.** Effect of aperture size on amplitude-frequency offset

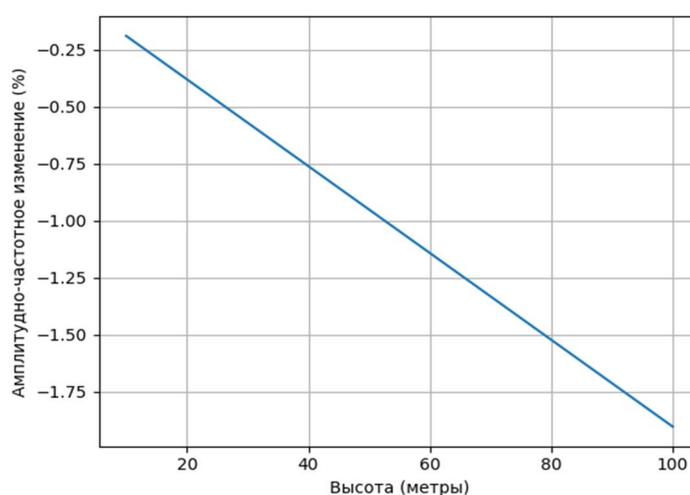


**Рис. 2.** Влияние амплитудно-частотного смещения на коэффициент поглощения

**Fig. 2.** Effect of amplitude-frequency offset on absorption coefficient

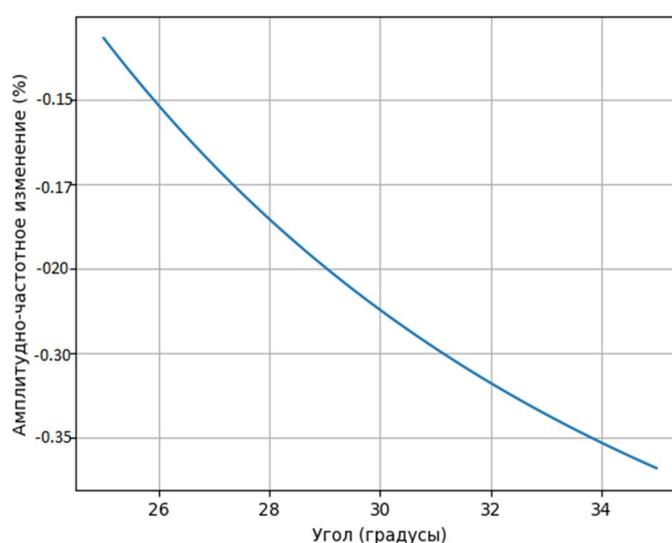
Следующее моделирование оценивает амплитудное смещение как функцию высоты. Для этого моделирования апертура фиксирована на 40 элементах, угол наклона фиксирован на  $30^\circ$  [19], а коэффициент поглощения фиксирован на 0,1 дБ/м. Результаты показаны на рис. 3, и видно, что существует линейная зависимость между высотой и смещением поглощения на умеренных и больших высотах. На малых высотах

проявляется смещение в сторону мелководья, что известно, но в данной работе не рассматривается. Последнее моделирование оценивает амплитудное смещение как функцию угла наклона. Для этого моделирования апертура фиксирована на 40 элементах, коэффициент поглощения фиксирован на 0,1 дБ/м, высота над уровнем моря фиксирована на 100 м. Результаты показаны на рис. 4.



**Рис. 3.** Влияние отдаления от донного покрытия на амплитудно-частотное смещение

**Fig. 3.** Effect of distance from the bottom cover on amplitude-frequency offset



**Рис. 4.** Влияние угла направления на амплитудно-частотное смещение

**Fig. 4.** Effect of the direction angle on the amplitude-frequency offset

Форма последнего члена в (8) была выбрана для моделирования формы кривой зависимости смещения поглощения от угла между двумя направлениями. Мы видим что амплитудно - частотное смещение пропорционально высоте и углу и поэтому хуже всего проявляется на максимальной глубине и большому углу направленности. Для прогнозирования величины ошибки источника, ранее обсуждаемого, необходимо иметь данные о параметрах окружающей среды, таких как уклон и коэффициент поглощения, который зависит от различных параметров, таких как давление, температура, соленость и другие свойства воды, но наиболее сильное влияние оказывает частота [20]. Поэтому для каждой акустической частоты рассматривается

только одно значение коэффициента поглощения, соответствующее давлению на уровне моря, например при температуре 5°C и солености 35 промилле. Общая длительная точность шести различных конфигураций лага скорости, включая поршневые приборы и приборы с фазированной решеткой в диапазоне от 150 кГц до 600 кГц, представлена в табл. 1. Поглощение оказывает отрицательное воздействие на точность измерений и приводит к занижению измеряемых значений. Определение точности в длительной перспективе в данном контексте – это точность лага скорости после усреднения в течение достаточно долгого времени, так что дисперсия приближается к нулю.

**Таблица 1.** Влияние амплитудно-частотной погрешности на общую длительную точность шести различных конфигураций лага

**Table 1.** Effect of amplitude-frequency error on the overall accuracy of six different lag configurations

Параметр / Parameter	Единица / Unit	Тип аппертуры антенны / Type of antenna aperture					
		ФАР	ПА	ФАР	ПА	ФАР	ПА
Частота	кГц	150	150	300	300	600	600
Угол направления луча	град	30	30	30	30	30	30
Диаметр аппертуры	см	15	13	11	7	6	7
Амплитудно-частотная погрешность поглощения	%	-0.646	-0.613	-0.341	-0.399	-0.229	-0.079

## Выводы

Была разработана модель, охватывающая амплитудно - частотное смещение поглощения, с целью прогнозирования точности данных о скорости с использованием эффекта Доплера. Коэффициент поглощения изменяется во

времени и в различных точках пространства, что может привести к изменению скорости распространения звука и, следовательно, к ошибкам в измерениях скорости.

В длительной перспективе эти изменения могут существенно повлиять на точность и надежность данных. По-

этому важно учитывать и компенсировать влияние амплитудно - частотного смещения поглощения при анализе и интерпретации результатов навигационных измерений. Точность данных улучшается при работе на расстояниях, которые не близки к максимально ука-

занному диапазону. Исследования смещения поглощения подтверждают, что данное явление оказывает значительное влияние на стабильность измерений в системе лага скорости в длительной перспективе.

### Список литературы

1. Гидроакустические навигационные средства / В.И. Бородин, Г.Е. Смирнов [и др.]. Л.: Судостроение, 1983. 262 с.
2. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. СПб.: Наука, 2004.
3. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. Л.: Судостроение, 1988.
4. Коняев К.В. Спектральный анализ случайных океанологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
5. Полканов К.И., Лоскутова Г.В., Попова О.С. Программный макет перспективного гидроакустического лага // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды IX Всероссийской конференции. СПб.: Наука, 2008.
6. Полканов К.И., Лоскутова Г.В. Пространственно-частотные и частотно- волновые методы описания и обработки гидроакустических полей. СПб.: Наука, 2007.
7. Кенни А., Лопез Г. Доплеровский гидролокатор: достижения и расширенные области применения // Океан. MTS/IEEE Использование энергии океана, 2012.
8. Кинси Дж. К., Юстис Р., Уиткомб Л. Л. Обзор навигации подводных аппаратов: последние достижения и новые вызовы // Конференция IFAC по маневрированию и управлению морскими судами. 2006. Т. 88. С. 1-12.
9. Безмен П.А. Исследование работы расширенного фильтра Калмана, дополненного адаптивным цифровым фильтром, для комплексирования данных системы управления мобильным роботом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1):68-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>.
10. Калман Р.Е., Бьюси Р.С. Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания // Труды американского общества инженеров- механиков, сер. Д. 1961. Т. 83. №. 1. С. 123-142.
11. Челпанов И.Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М.: Наука, 1967.
12. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана. М., 2016. 396 с.

13. Андреева Л.П., Агеев Е.В. Применение метода акустической эмиссии для контроля образования микротрещины в точечном тонколистовом сварном соединении // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016;20(2):8-14.

14. Папулис А., Пиллай С. У. Вероятность, случайные переменные и стохастические процессы. 4-е изд. Нью-Йорк: McGraw-Hill, 2002.

15. Давыдов М.Н., Липатова А.П., Ткаченко Ю.С. Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(2):18-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28>

16. Виноградов К.А., Кошкарёв В.Н. Абсолютные и относительные лаги: справочник. Л.: Судостроение, 1990.

17. Пасси Г.С. Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 2 (44). С. 56–64.

18. Пинкель Р. О стимулировании качества данных доплеровского гидролокатора // Доклады IEEE, 2-я рабочая конференция по текущим измерениям. 1982. С. 113-116.

19. Мустье К., Вендельбоэ Г. Угловая зависимость высокочастотного обратного акустического рассеяния морского дна (200-400 kHz) // Академия акустических наук. 2011. Т. 130. № 4.

20. Франсуа Р. Е., Гаррисон Г. Р. Поглощение звука на основе океанических измерений. Часть I: Чистая вода и вклад сульфата магния // Журнал Акустического общества Америки. 1982. Т. 72. № 3. С. 896-907.

## References

1. Borodin V.I., Smirnov G.E. *Gidroakusticheskie navigatsionnye sredstva* [Hydroacoustic navigation aids]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983.

2. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. *Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika* [Korabelnaya hydroacoustic technique]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2004.

3. Gusev V.G. *Sistemy prostranstvenno-vremennoi obrabotki gidroakusticheskoi informatsii* [Systems of spatial-temporal processing of hydroacoustic information]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988.

4. Konyaev K.V. *Spektral'nyi analiz sluchainykh okeanologicheskikh polei* [Spectral analysis of random oceanologic fields]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981.

5. Polkanov K.I., Loskutova G.V., Popova O.S. [Program layout of a perspective hydroacoustic lag]. *Trudy IX Vserossiiskoi konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Proceedings of IX All-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics"]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2008.

6. Polkanov K.I.; Loskutova G.V. *Prostranstvenno-chastotnye i chastotno-volnovye metody opisaniya i obrabotki gidroakusticheskikh polei* [Spatial-frequency and frequency-wave methods of the hydroacoustic fields description and processing]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2007.

7. Kenny A., Lopez G. Doplerovskii gidrolokator: dostizheniya i rasshirennye oblasti primeneniya [Doppler sonar: achievements and extended applications]. *Okean. MTS/IEEE Ispol'zovanie energii okeana = Ocean. MTS/IEEE Harnessing Power Ocean*, 2012.

8. Kinsey J. K., Eustis R., Whitcomb L. L. Obzor podvodnoi navigatsii podvodnykh apparatov: Poslednie dostizheniya i novye zadachi [A review of underwater navigation of submarines: Recent advances and new challenges]. *Konferentsiya IFAC po manevrirovaniyu i upravleniyu morskimi sudami = IFAC Conference on Maneuvering and Management of Marine Vessels*, 2006, vol. 88, pp. 1-12.

9. Bezmen P. A. Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 68-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>.

10. Kalman R.E., Bucy R.S. Novye rezul'taty v lineinoi fil'tratsii i teorii predskazaniya [New results in linear filtering and prediction theory]. *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov- mekhanikov = Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers*, ser. D, 1961, vol. 83, no. 1, pp. 123-142.

11. Chelpanov I.B. *Optimal'naya obrabotka signalov v navigatsionnykh sistemakh* [Optimal signal processing in navigation systems]. Moscow, Nauka Publ., 1967.

12. Shakhhtar B.I. *Fil'try Vinera i Kalmana* [Wiener and Kalman filters]. Moscow, 2016. 396 p.

13. Andreeva L.P., Ageev E.V. Application of acoustic emission method for control of microcrack formation in spot thin plate welded joint. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016; 20(2):8-14 (In Russ.).

14. Papoulis A., Pillai S. V. *Veroyatnost', sluchainye peremennye i stokhasti-cheskie protsessy* [Probability, Random Variables and Stochastic Processes]. New York, McGraw-Hill Publ., 2002.

15. Davydov M. N., Lipatova A. P., Tkachenko Y. S. Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 18-28 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28>

16. Vinogradov K.A., Koshkaryov V.N. *Absolyutnye i otnositel'nye lagi* [Absolute and relative lags]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1990.

17. Passi G.S. Tekhnologiya fazirovannykh reshetok – sovremennaya realizatsiya peredovykh reshenii v oblasti UZK, nakoplenykh v proshlom veke [Technology of phased arrays - modern realization of advanced solutions in the field of ultrasonic testing accumulated in the last century]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = In the World of Nondestructive Testing*, 2009, no 2 (44), pp. 56-64.

18. Pinkel R. O stimulirovanii kachestva dannykh doplerovskogo gidrolokatora [On the stimulation of Doppler sonar data quality]. *Doklady IEEE, 2-ya rabochaya konferentsiya po tekushchim izmereniyam = IEEE Papers, 2nd Working Conference on Current Measurements*, 1982, pp. 113-116.

19. Mustier K., Wendelboe G. Vendel'boe G Uglovaya zavisimost' vysokochastotnogo obratnogo akusticheskogo rasseyaniya morskogo dna (200-400 kHz) [Angular dependence of high-frequency seafloor acoustic backscattering (200-400 kHz)]. *Akademiya akusticheskikh nauk = Academy of Acoustical Sciences*, 2011, vol. 130, no. 4.

20. Francois R. E., Garrison G. R. Pogloshchenie zvuka na osnove okeanicheskikh izmerenii. Chast' I: Chistaya voda i vklad sul'fata magniya [Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure Water and magnesium sulfate contributions]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, no. 3, pp. 896–907.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Евсюков Петр Сергеевич**, инженер-программист ЦНИИ Курс, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

**Petr S. Evsyukov**, Software Engineer, Central Scientific Research Institute Kurs, Moscow, Russian Federation, e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

**Андреева Ольга Николаевна**, доктор технических наук, руководитель научно-методического центра АО «Концерн «Моринсис-Агат», профессор БК232 РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: nauka@concern-agat.ru

**Olga N. Andreeva**, Dr. of Sci. (Engineering), Head of Scientific and Methodological Center of JSC "Concern "Morinsis-Agat", Professor BK232 RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, e-mail: nauka@concern-agat.ru

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>

## Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления

О.Г. Бондарь<sup>1</sup> ✉, Е.О. Брежнева<sup>1</sup>, К.А. Ботиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: b.og@mail.ru

### Резюме

**Цель работы:** исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления (ТС) с использованием его математической модели. Провести апробацию модели и исследования, позволяющие оценить потенциальные возможности метода обработки измерительной информации, в основу которого положено определение сопротивления ТС по результатам интегрирования переходного процесса в измерительной схеме после отключения её источника питания, определить параметры измерительной цепи и алгоритма, положенных в основу метода. Для заданного диапазона измеряемых температур определить вид и параметры модели адаптивного алгоритма измерения.

**Методы:** методы математического моделирования, численные методы. При разработке математической модели метода использовалась теория электрических цепей, в частности, анализ переходных процессов. При анализе предложенных решений учитывалось воздействие электромагнитных помех и эффектов квантования, а эффективность оценивалась по относительной погрешности ( $\delta$ ) измерения сопротивления ТС и сравнению с аналогами. Моделирование осуществлялось в среде MATLAB.

**Результаты.** Разработана математическая модель интегрирующего метода измерения температуры с помощью ТС, осуществлен выбор оптимальной величины шунтирующей емкости для диапазона измеряемых температур 0 ... 660 оС, обеспечивающий в пределах диапазона расчётную величину среднеквадратичной погрешности (СКО) 0.02% -0.04%, определена оптимальная величина первого интервала интегрирования (4 мс). Показано, что для адаптивного алгоритма измерения возможен выбор линейной модели. Проведена оценка эффективности метода в сравнении с методом определения сопротивления ТС по двум отсчётам переходного процесса.

**Заключение.** Представлены результаты математического моделирования метода измерения температуры на основе оценки величины сопротивления ТС по результатам численного интегрирования переходного процесса разряда конденсатора, подключенного параллельно резистору, позволяющие оптимизировать алгоритмы, лежащие в основе его функционирования, а также судить об эффективности предложенного решения. Двухпроводный метод, основанный на определении сопротивления ТС по результатам интегрирования переходного процесса при выключении питания измерительной цепи позволяет повысить достигнутую точности измерения температуры сопоставимой с точностью трех и четырехпроводных схем, исключив недостатки, связанные с их сложностью и высокой стоимостью.

**Ключевые слова:** термометр сопротивления; температура; математическая модель; погрешности измерения; двухпроводная линия.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А., 2024

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 71-87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>.

Поступила в редакцию 26.12.2023

Подписана в печать 13.02.2024

Опубликована 27.03.2024

## Research of the Method For Measuring Temperature with a Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer

Oleg G. Bondar <sup>1</sup> ✉, Ekaterina O. Brezhneva <sup>1</sup>, Konstantin A. Botikov <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: b.og@mail.ru

### Abstract

**Purpose:** study of a method for measuring temperature with a two-wire connection of a resistance thermometer (RT) using its mathematical model. Conduct model testing and research to evaluate the potential capabilities of the measurement information processing method, which is based on determining the resistance of the vehicle based on the results of integrating the transient process in the measuring circuit after turning off its power source, determine the parameters of the measuring circuit and the algorithm underlying the method. For a given range of measured temperatures, determine the type and parameters of the adaptive measurement algorithm model.

**Methods:** methods of mathematical modeling, numerical methods. When developing a mathematical model of the method, the theory of electrical circuits was used, in particular, the analysis of transient processes. When analyzing the proposed solutions, the impact of electromagnetic interference and quantization effects was taken into account, and the effectiveness was assessed by the relative error ( $\delta$ ) of measuring the resistance of the vehicle and comparison with analogues. The simulation was carried out in the MATLAB environment.

**Results:** a mathematical model of an integrating method for measuring temperature using a TS was developed, the optimal value of the shunt capacitance was selected for the range of measured temperatures 0 ... 660 °C, providing within the range the calculated value of the root-mean-square error (RMS) of 0.02% -0.04%, the optimal value was determined first integration interval (4 ms). It is shown that for the adaptive measurement algorithm it is possible to select a linear model. The effectiveness of the method was assessed in comparison with the method of determining the resistance of the vehicle using two readings of the transient process.

**Conclusion:** The results of mathematical modeling of a method for measuring temperature based on estimating the resistance value of a vehicle based on the results of numerical integration of the transient discharge process of a capacitor connected in parallel with a resistor are presented, making it possible to optimize the algorithms underlying its operation, as well as to judge the effectiveness of the proposed solution.

The two-wire method, based on determining the resistance of the vehicle based on the results of integrating the transient process when the power of the measuring circuit is turned off, makes it possible to increase the accuracy of temperature measurement comparable to the accuracy of three and four-wire circuits, eliminating the disadvantages associated with their complexity and high cost.

**Keywords:** resistance thermometer; temperature; mathematical model; measurement errors; two-wire line.

**Conflict of interest.** *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

**For citation:** Bondar O. G., Brezhnev E. O., Botikov K. A. Research of the Method For Measuring Temperature with a Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 71-87 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>.

Received 26.12.2023

Accepted 13.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

## Введение

Измерение температуры является критически важным в различных областях, включая промышленность, науку, медицину и бытовые цели. Существует множество методов измерения температуры, включая контактные и бесконтактные методы [1-16].

Контактные методы подразумевают применение термометров, которые физически соприкасаются с объектом для измерения его температуры, такие как: термопары, ртутные термометры, терморезисторы (термометры сопротивления). К преимуществам применения ТС относится высокая точность и возможность измерения температуры в широком диапазоне.

В зависимости от способа подключения ТС к измерительным приборам различают двухпроводные, трехпроводные и четырехпроводные методы измерения температуры [16]. Эти методы различаются по своим характеристикам и применению в различных условиях.

Двухпроводная схема измерения температуры является самой простой, она используется при прямом подключении ТС к измерительному прибору и при

малой длине проводников является доминирующей [14]. Однако сопротивление проводов вносит погрешности в результаты измерений. Это делает двухпроводные схемы менее точными для измерения температуры при большой длине присоединительной линии или в условиях изменения температуры окружающей среды.

Трехпроводная схема измерения температуры решает проблемы, связанные с сопротивлением проводов. Она использует три провода: два провода сигнальной линии и третий для компенсации сопротивления проводов, что хорошо работает в случае полной идентичности проводников сигнальной линии.

Четырехпроводная схема использует два провода для возбуждения ТС (токовые проводники) и два – для измерения напряжения на ТС (потенциальные проводники). Эта схема позволяет минимизировать ошибки, связанные с влиянием проводов присоединительной линии, и обеспечивает наиболее точные измерения температуры даже в условиях с переменной температурой окружающей среды и большой длиной присоединительной линии.

Трехпроводные и четырехпроводные схемы обеспечивают высокую точ-

ность измерений, особенно в сложных условиях, но в совокупности с большим расходом меди и относительно сложной электронной схемой измерительного устройства имеют высокую стоимость. Дополнительные сложности возникают в многоканальных системах измерения температуры, которые в большинстве случаев строятся как сканирующие системы, что связано с необходимостью коммутации четырёх линий.

Поэтому предпринимаются попытки применения двухпроводной присоединительной линии и при её большой длине. В [15] предложен метод компенсации сопротивления проводников двухпроводной линии, базирующийся на применении диода, шунтирующего соединённые последовательно второй диод и ТС, и питании линии трёхуровневыми импульсами тока положительной и отрицательной полярности. Последующая обработка измеряемых напряжений на зажимах двухпроводной линии позволяет определить сопротивление проводников и существенно ослабить их влияние на точность измерения сопротивления ТС. Схема требует применения 4 точных резисторов и относительно сложной измерительной схемы на операционных усилителях.

Авторами запатентован ряд способов ослабления влияния сопротивления проводников, соединяющих ТС с измерительным устройством [10, 17, 19], а детальное их рассмотрение представлено в [11, 18, 20]. В способе, предложенном в [19], сопротивление ТС определяется по результатам интегрирования напряжения разряжающегося на ТС кон-

денсатора, который заряжается импульсом напряжения. Поскольку при измерении этого напряжения источник питания измерительной цепи отключен, и ток по проводам присоединительной линии не протекает, то её влияние исключается. Измерительная схема оказывается существенно проще трёхпроводных и четырёхпроводных, однако требуется оптимизация параметров схемы и алгоритма измерения с учётом изменения сопротивления ТС в диапазоне температур, наличия шумов и эффектов квантования.

Необходимые исследования проводятся на математической модели.

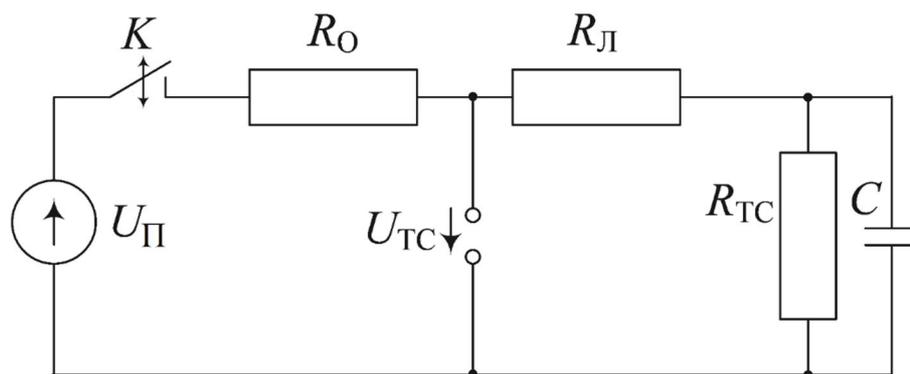
## Материалы и методы

Предложенные авторами методы измерения температуры ТС, подключённым двухпроводной линией, используют единую измерительную схему, представленную на рис.1.

Ключом  $K$  измерительная цепь подключается к стабильному источнику питания  $U_{\Pi}$  на интервал времени, достаточный для полного заряда конденсатора  $C$ . При этом по завершении заряда ток в цепи:

$$I = U_{\Pi} / (R_0 + R_{\text{Л}} + R_{\text{ТС}}), \quad (1)$$

где  $U_{\Pi}$  – относительно стабильный источник напряжения (напряжение питания устройства, к которому предъявляются требования кратковременной стабильности в течение времени одного измерения – около сотни мс);  $R_0$  – сопротивление опорного резистора;  $R_{\text{Л}}$  – сопротивление линии, соединяющей ТС с измерительным устройством;  $R_{\text{ТС}}$  – сопротивление ТС.



**Рис. 1.** Схема измерительной цепи для двухпроводного подключения ТС:  $U_{\text{П}}$  – стабильный источник напряжения;  $K$  – ключ;  $R_0$  – опорный резистор;  $R_{\text{Л}}$  – сопротивление соединительной линии;  $U_{\text{ТС}}$  – напряжение на ТС;  $R_{\text{ТС}}$  – ТС;  $C$  – конденсатор

**Fig. 1.** Circuit diagram of the measuring circuit for two—wire connection of the vehicle:  $U_{\text{П}}$  – stable voltage source;  $K$  – key;  $R_0$  – reference resistor;  $R_{\text{Л}}$  – resistance of the connecting line;  $U_{\text{ТС}}$  – voltage on the vehicle;  $R_{\text{ТС}}$  – TC;  $C$  – capacitor

В конце заряда конденсатора измеряется напряжение на опорном резисторе. Поскольку через него и ТС протекает один и тот же ток, то напряжения на ТС и опорном резисторе пропорциональны величинам их сопротивлений. При отключении источника напряжения в первый момент времени напряжение на ТС остаётся таким же, как и в конце заряда конденсатора. Поскольку ток в цепи при отключении отсутствует, то напряжение на входе соединительной линии, с помощью которой ТС подключён к измерительному устройству, равно напряжению на ТС. Это напряжение может быть измерено методом, описанным в [10, 11]. Однако погрешность этого метода обусловлена затухающими колебаниями, вызванными переходным процессом в соединительной линии, наличием помех и шумов квантования.

В [17, 18] представлено решение, позволяющее восстановить значение

напряжения на ТС по двум значениям напряжения, измеренным в моменты времени  $t_1$  и  $t_2 = 2t_1$ , отстоящие от момента отключения источника напряжения на интервал, превышающий время затухания переходного процесса в соединительной линии. Однако и в этом случае помехи и шумы квантования сильно влияют на погрешность измерения.

Существенно ослабить влияние всех перечисленных факторов можно, применив более сложную обработку измерительной информации. В [19, 20] представлен вариант решения, опирающийся на интегрирование напряжения ТС в течение времени полного разряда конденсатора. При этом расчёт сопротивления ТС осуществляется по значениям интеграла напряжения на некотором интервале  $t_1$  и всём интервале разряда конденсатора.

Интеграл напряжения на конденсаторе за временной интервал  $t$  от момен-

та начала разряда определяется согласно следующему выражению:

$$S = \int_0^t U_{TC0} \exp(-t/\tau) dt = \tau U_{TC} [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (2)$$

где  $\tau = R_{TC}C$  – постоянная времени, цепи термометра сопротивления при отключенном источнике возбуждения;  $U_{TC0}$  – напряжение на термометре сопротивления при полностью заряженном конденсаторе.

Определим значение интеграла на интервалах от начала разряда конденсатора до момента времени  $t_1$  и от начала разряда до завершения переходного процесса ( $8 \dots 10\tau$ ):

$$\begin{cases} S_1 = \tau U_{TC0} [1 - \exp(-t_1/\tau)] \\ S_2 = \tau U_{TC0}. \end{cases} \quad (3)$$

Постоянная времени, определённая из (3)

$$\tau = -t_1 / \ln(1 - S_1 / S_2). \quad (4)$$

Подстановка постоянной времени в выражение для  $S_2$  (3) позволяет определить напряжение на ТС в момент начала разряда

$$U_{TC0} = -\frac{S_2}{t_1} \ln(1 - S_1 / S_2). \quad (5)$$

Из (1) и (5) рассчитывается сопротивление ТС

$$R_{TC} = R_0 U_{TC0} / U_0. \quad (6)$$

Поскольку целью применения двухпроводных методов является снижение стоимости оборудования и повышение надёжности функционирования, то рассматривается вариант решения задачи с использованием минимального количества оборудования, в предель-

ном случае: микроконтроллера со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), одного точного резистора, конденсатора и термометра сопротивления (рис.1).

Широко применяемые в промышленности устройства содержат дополнительно: источники опорного напряжения или тока; специализированные интегральные схемы, базирующиеся, как правило, на сигма-дельта АЦП; фильтр входного напряжения; несколько дополнительных точных резисторов в измерительной схеме. Микроконтроллер является практически обязательным устройством, которое управляет АЦП, выполняет преобразование измерительной информации в температуру, поддерживает функции индикации и/или внешний интерфейс.

В рассматриваемом устройстве целесообразно использовать микроконтроллеры со встроенным АЦП. В настоящее время подобные МК являются доминирующими на рынке.

Для оценки потенциальных возможностей метода и выбора параметров схемы и алгоритма обработки в MATLAB построена математическая модель, позволяющая определить значение напряжения на входе присоединительной линии в конце заряда конденсатора, воспроизвести процесс разряда конденсатора на ТС, выполнить интегрирование и рассчитать значения интегралов  $S_1$  и  $S_2$  при отключении питания измерительной цепи, рассчитать по выражениям (4), (5), (6) величину сопротивления ТС, относительную погрешность его

измерения в %. При этом, в пределах диапазона измерения температуры, с выбранным шагом изменяется сопротивление ТС, а для каждого значения его сопротивления автоматически, с заданным шагом (10), изменяется интервал измерения  $t_1$ . Модель является многофакторной и дополнительно учитывает влияние шага квантования, интервала дискретизации и наличие шумов, помех.

Модель позволяет оценить поведение погрешности измерения ТС, с учётом изменения его сопротивления. Изменение сопротивления на ТС приводит к изменению соотношения напряжения на опорном резисторе и напряжения на ТС в момент полного заряда конденсатора, что при заданной разрядности АЦП (иначе, относительном шаге квантования  $h$ ) вызывает перераспределение погрешностей измерения этих напряжений. Кроме того, изменение постоянной времени  $\tau = R_{ТС} \times C$ , при фиксированной частоте дискретизации, изменяет погрешность интегрирования, т.к. одновременно действуют два фактора – меняется скорость разряда конденсатора и соотношение интервалов интегрирования.

В устройстве возможно применение 8-разрядных МК, производительность которых и объёмы оперативной памяти ограничены. Это требует проводить интегрирование на лету без предварительного сохранения преобразованных в код отсчётов напряжения в оперативной памяти, а для организации интегрирования использовать интервал дискретизации

$\Delta t$ , что заставляет, с одной стороны, использовать механизм прерывания при работе с АЦП, а с другой – целочисленную арифметику и простейшие способы интегрирования. Разумным выбором является метод трапеций, поскольку по производительности он практически эквивалентен методу прямоугольников, а погрешность интегрирования ( $\Delta_{и}$ ) существенно меньше и оценивается выражением:

$$\Delta_{и} \leq \frac{t^3}{12n^2} \cdot \max \left| \frac{d^2 F(t)}{dt^2} \right| = \frac{t^3}{12n^2} \cdot \frac{U_{ТС0}}{\tau^2} \approx \frac{n^2 \Delta t^2 t}{12n^2} \cdot \frac{U_{ТС0}}{\tau^2} = \frac{t}{12} U_{ТС0} \left( \frac{\Delta t}{\tau} \right)^2.$$

С помощью разработанной математической модели исследованы: поведение погрешности измерения ТС при разных значениях его сопротивления и вариации величины первого интервала интегрирования без учёта эффекта квантования, что позволяет оценить характер поведения погрешности измерения для случая АЦП большой разрядности (от 14 разрядов), без выпадающих кодов;

– поведение погрешности измерения ТС при разных значениях его сопротивления и вариации величины первого интервала интегрирования с учётом квантования (10-разрядный АЦП);

– поведение погрешности измерения ТС при разных значениях его сопротивления и вариации величины первого интервала интегрирования с учётом воздействия электромагнитных шумов (нормально распределённый

шум со стандартным отклонением равным шагу квантования) и эффекта квантования.

Рассмотрим факторы, определяющие диапазоны изменения варьируемых величин. Наибольшим диапазоном измерений обладают платиновые ТС. В промышленности чаще всего используются таблицы номинальных стандартных характеристик (НСХ) для определения температуры по величине сопротивления ТС. Погрешность, обеспечиваемая использованием НСХ, не превышает  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом сами платиновые ТС могут быть выполнены как проволочные или как плёночные. Первые имеют более широкий диапазон рабочих температур – до  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В соответствии с уравнением Каллендара-Ван Дьюзена, в котором коэффициентами при квадратичной и кубической составляющей при оценке диапазона изменения температуры можно пренебречь

$$R_T \leq R_0 \cdot (1 + 0.0039083 \cdot T) \approx 3.58R_0.$$

Таким образом диапазон изменения сопротивления ТС может быть ограничен четырёхкратным.

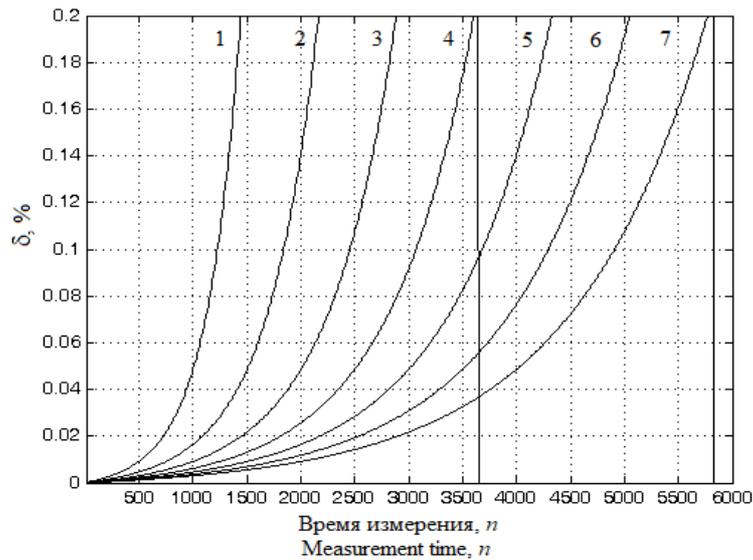
При численном интегрировании напряжения переходного процесса время интегрирования определяется как количество интервалов интегрирования, умноженное на шаг дискретизации. Для практической проверки рассмотренных решений использовался макет на основе микроконтроллеров фирмы ATMEL, поскольку у этого семейства есть отечественные аналоги, выпускаемые НИИЭТ (Воронеж)

1887BE4У, 1887BE7Т, 1887BE8Т, и среди 8-разрядных МК это семейство выделяются как одно из наиболее производительных по доступной цене. Исследование их АЦП позволило определить наименьший шаг дискретизации, который они могут обеспечить без потери точности – 26 мкс.

## Результаты и их обсуждение

Исследования проводились численным методом в среде *MATLAB*. На рис. 2 представлены результаты моделирования в идеализированных условиях, что соответствует применению АЦП с высокой разрешающей способностью. Диапазон изменения относительной погрешности определения сопротивления ТС ограничен величиной 0.2%. Представленное семейство из 7 кривых обеспечивает перекрытие по температуре  $0 - 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Время на всех представленных рисунках представлено в виде числа отсчётов, полученных при постоянном времени дискретизации, т.е.  $t = n\Delta t$ .

Поскольку АЦП приводит к квантованию аналогового напряжения, то это приводит к росту погрешности определения сопротивления ТС. Интегрирование улучшает ситуацию, поскольку срабатывает механизм передискретизации и дидеринга за счёт формы кривой напряжения, что приводит к повышению разрешающей способности и частичной компенсации возрастания погрешности за счёт квантования.

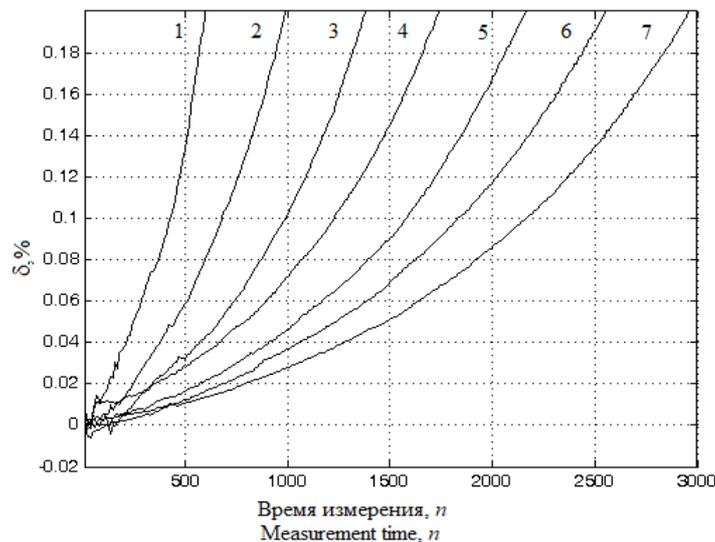


**Рис. 2.** Зависимость относительной погрешности измерений  $R_{ТС}$  ( $\delta \leq 0,2\%$ ): 1 – 1 кОм; 2 – 1,5 кОм, 3 – 2 кОм; 4 – 2,5 кОм; 5 – 3 кОм; 6 – 3,5 кОм, 7 – 4 кОм

**Fig. 2.** Dependence of the relative measurement error RTS ( $\delta \leq 0.2\%$ ): 1 – 1 kOhm; 2 – 1.5 kOhm, 3 – 2 kOhm; 4 – 2,5 kOhm; 5 – 3 kOhm; 6 – 3.5 kOhm, 7 – 4 kOhm

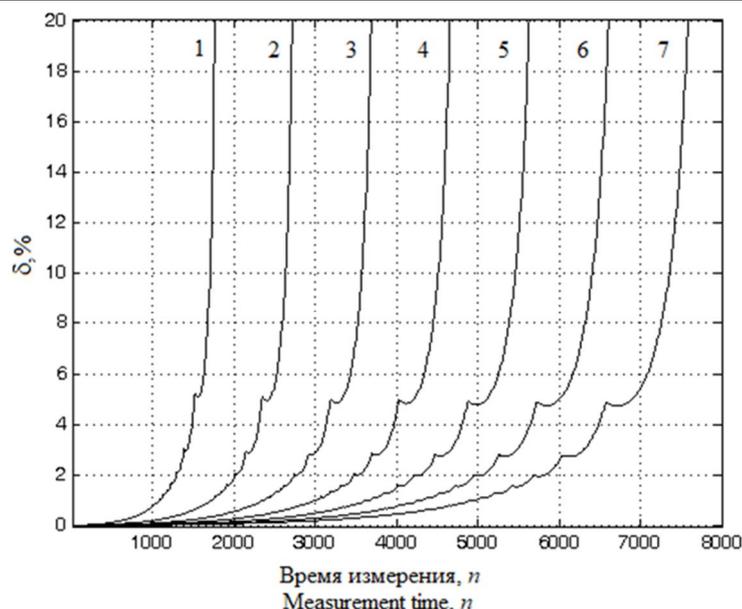
На рис. 3 представлены результаты моделирования для этого случая. Как и на рис. 2 кривые пронумерованы в порядке возрастания номинального сопротивления ТС с шагом 0.5 кОм.

Рис. 4 демонстрирует резкое возрастание погрешности измерения при приближении времени интегрирования на первом интервале ко времени полного интегрирования.



**Рис. 3.** Зависимость относительной погрешности измерений  $R_{ТС}$  от времени измерения при квантовании результатов измерения: 1 – 1 кОм; 2 – 1,5 кОм; 3 – 2 кОм; 4 – 2,5 кОм; 5 – 3 кОм; 6 – 3,5 кОм; 7 – 4 кОм

**Fig. 3.** The dependence of the relative measurement error RTS on the measurement time when quantizing the measurement results: 1 – 1 kOhm; 2 – 1,5 kOhm; 3 – 2 kOhm; 4 – 2,5 kOhm; 5 – 3 kOhm; 6 – 3,5 kOhm, 7 – 4 kOhm



**Рис. 4.** Зависимость относительной погрешности измерений  $R_{ТС}$  от времени измерения при квантовании результатов измерения ( $\delta \leq 20\%$ ): 1 – 1 кОм; 2 – 1,5 кОм; 3 – 2 кОм; 4 – 2,5 кОм; 5 – 3 кОм; 6 – 3,5 кОм, 7 – 4 кОм

**Fig. 4.** The dependence of the relative measurement error RTS on the measurement time when quantizing the measurement results ( $\delta \leq 20\%$ ): 1 – 1 kOhm; 2 – 1,5 kOhm, 3 – 2 kOhm; 4 – 2.5 kOhm; 5 – 3 kOhm; 6 – 3.5 kOhm, 7 – 4 kOhm

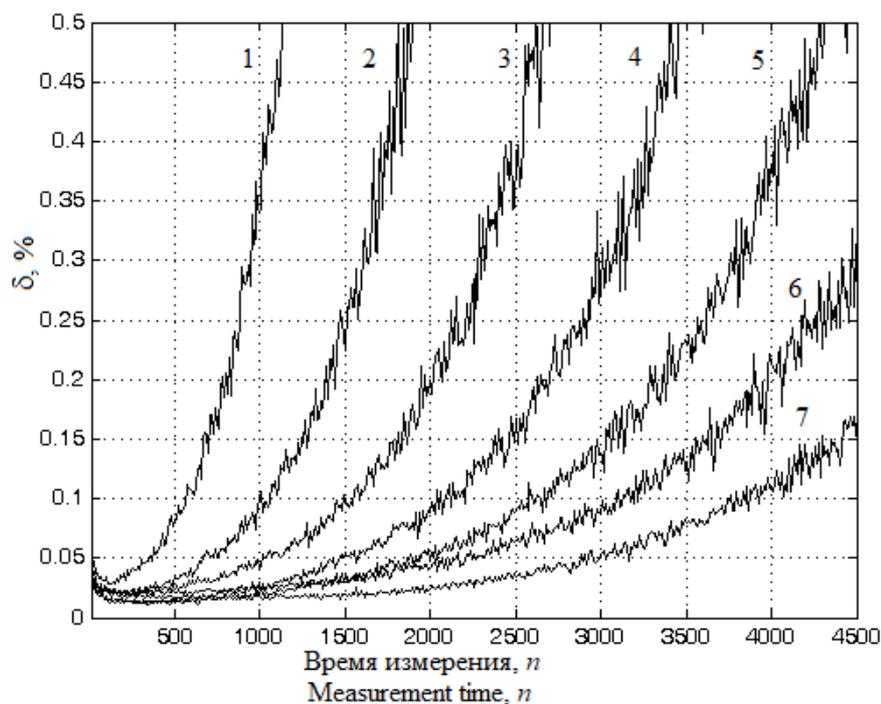
Поскольку при реальных условиях измерения напряжение питания цепи измерения подвергается воздействию шумов, то в математической модели предусмотрено добавление на каждом шаге многократного измерения напряжения на опорном резисторе шумового сигнала с нормальным распределением и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ , равным шагу квантования  $h$ , а результат каждого измерения подвергается квантованию. Аналогично в алгоритме обрабатывается и напряжение, поступающее с ТС. В данном случае определяется относительная величина среднеквадратичного отклонения сопротивления  $R_{ТС}$  от его номинального значения по результатам обработки 100 измерений в каждой точке.

Рис. 5 демонстрирует зависимость погрешности измерения от длительности первого интервала интегрирования.

Представленные результаты позволяют сделать нижеследующие выводы.

В любых условиях увеличение первого интервала интегрирования до значений, приближающихся к интервалу полного разряда конденсатора шунтирующего ТС, погрешность измерения сопротивления ТС резко возрастает. На этот факт не влияет ни повышение разрядности АЦП, ни увеличение постоянной времени, что эквивалентно повышению частоты дискретизации, ни уменьшение уровня шумов.

При повышении разрядности АЦП и при минимальных шумах возрастание погрешности становится более монотонным.



**Рис. 5.** Зависимость средне квадратического относительного отклонения сопротивления от номинального значения  $R_{TC}$  при зашумлении нормально распределённой величины с  $\sigma$ , равной одному шагу квантования: **1** – 1 кОм; **2** – 1,5 кОм; **3** – 2 кОм; **4** – 2,5 кОм; **5** – 3 кОм; **6** – 3,5 кОм, **7** – 4 кОм

**Fig. 5.** Dependence of the average quadratic relative deviation of the resistance from the nominal value of  $R_{TC}$  with noise of a normally distributed value with  $\sigma$  equal to one quantization step: **1** – 1 kOhm; **2** – 1,5 kOhm; **3** – 2 kOhm; **4** – 2,5 kOhm; **5** – 3 kOhm; **6** – 3,5 kOhm, **7** – 4 kOhm

Шумы с уровнем, близким к шагу квантования, приводят к появлению явного минимума на зависимостях погрешности измерения сопротивления ТС от величины первого интервала интегрирования.

Для минимизации погрешности определения ТС величина первого интервала интегрирования может быть увеличена в соответствии с линейной моделью, т.е. возможно введение автоматической подстройки интервала интегрирования по оценке сопротивления ТС без учёта влияния сопротивления присоединительной линии.

Погрешность определения ТС может быть снижена с увеличением постоянной времени цепи ТС примерно в три раза по сравнению с текущим значением, что соответствует для данных условий трёхкратному увеличению ёмкости конденсатора.

Применение метода определения сопротивления ТС по результатам интегрирования напряжения переходного процесса разряда конденсатора шунтирующего ТС позволяет помимо подавления влияния сопротивления присоединительной линии снизить величину

погрешности измерения ниже значения шага квантования.

Для сравнения приведены результаты измерения величины ТС на экспериментальном стенде, методом определения величины ТС по измерениям в двух точках переходного процесса для одного конкретного значения сопротивления с теми же параметрами измерительной цепи и 10-разрядным АЦП [18].

Результаты сравнения представлены в табл. 1, где:  $k$  – номер измерения;  $R$  – измеренное значение сопротивления. Среднее значение измеренного сопротивления равно 0,9608 кОм, а среднее квадратичное отклонение измеренного значения относительно среднего значения составило 1,3 Ом, т.е. превысило 0,1%. При этом номинальное значение сопротивления равно 0,963 кОм.

**Таблица 1.** Результаты измерения сопротивления на стенде

**Table 1.** Results of resistance measurement on the stand

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R$ , кОм	0.962	0.960	0.962	0.962	0.963	0.961	0.962	0.961	0.963	0.961
$k$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R$ , кОм	0.963	0.962	0.961	0.962	0.959	0.960	0.961	0.96	0.961	0.962
$k$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$R$ , кОм	0.961	0.959	0.959	0.961	0.960	0.960	0.960	0.959	0.959	0.959

В соответствии с рис. 5 для сопротивления 1 кОм среднее квадратичное отклонение от номинального значения не превысило 0,03%. Следует также учесть, что снизить величину погрешности определения ТС за счёт усреднения по [18] можно повторными измерениями. В рассматриваемом методе необходимости в многократных измерениях нет, а это позволяет многократно повысить скорость измерений, что важно в многоканальных системах измерения температуры.

## Выводы

Описан метод измерения температуры ТС, подключённым двухпроводной линией, позволяющий исключить влияние сопротивления линии на результаты измерения, и использующий

для определения величины сопротивления ТС результаты интегрирования напряжения переходного процесса разряда предварительно заряженного конденсатора, шунтирующего ТС. Метод обладает преимуществами двухпроводных схем и точностью сопоставимой с трех- и четырехпроводными схемами. Разработана соответствующая математическая модель интегрирующего метода, позволяющая оценить зависимость относительной погрешности измерения сопротивления ТС от величины первого интервала интегрирования при разных величинах термометра сопротивления и учитывающая влияние дополнительных факторов, таких как: шаг квантования, интервал дискретизации, наличие электромагнитных помех.

С помощью математической модели оценен общий характер поведения погрешности измерения для идеализированного случая, с учётом квантования, и в условиях наличия шумов, распределённых по нормальному закону с среднеквадратичным отклонением, соответствующим шагу квантования при одновременном квантовании измеряемого сигнала.

Определены следующие параметры: оптимальная величина шунтирующей емкости при заданном диапазоне измеряемых температур и выбранном интервале дискретизации 26 мкс (20 мкФ), оптимальная величина первого интервала интегрирования (4 мс для

нижней границы диапазона измеряемых температур – 0 °С) и поправочный коэффициент ( $k = U_{TC}/U_0$ ), величина которого оценивается по результатам грубой оценки напряжения на ТС измерением напряжения на зажимах присоединительной линии в конце импульса заряда конденсатора. Для выбора оптимального значения при адаптивном алгоритме измерения достаточно использования линейной модели.

Проведена оценка эффективности метода в сравнении с методом определения сопротивления ТС по результатам измерения напряжения переходного процесса в двух точках.

### Список литературы

1. Каспаров К. Н., Белозеров А. В. Измерение температуры быстропротекающих процессов // Измерительная техника. 2002. № 12. С. 34–38. <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>
2. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers // Int J Thermophys. 2019. vol. 40. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.
3. Kowal A., Manuszkiewicz H., Kołodziej B. et al. Tests of the Stability of Chinese RhFe Resistance Thermometers at Low Temperatures // Int J Thermophys. 2017. Vol. 38. Pp. 38–95. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2232-8>.
4. Лапшинов Б. А. Методы измерения температуры в технологиях сверхвысокочастотного нагрева // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 20–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-20-28>.
5. Zhang M., Zhang J., Qiao L., Wang T. Distributed Fiber Optic Raman Thermometer and Applications // In: Novel Optical Fiber Sensing Technology and Systems. Progress in Optical Science and Photonics. 2024. Vol 28. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-7149-7-6>.
6. Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А. Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 51–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-51-55>

7. Cheung Y., Jing Z., Liu Q. et al. Fast-Response Fiber-Optic FPI Temperature Sensing System Based on Modulated Grating Y-Branch Tunable Laser // *Photonic Sens.* 2024. Vol. 14. No. 1. <https://doi.org/10.1007/s13320-023-0690-0>.
8. Woo K.R., Kim H.B., Kim H.L. et al. An MMC-Based Temperature Control System for a Long-Term Data Collection // *J Low Temp Phys.* 2022. Vol. 209. Pp. 1218–1225 <https://doi.org/10.1007/s10909-022-02805-w>.
9. Reihani A., Meyhofer E., Reddy, P. Nanokelvin-resolution thermometry with a photonic microscale sensor at room temperature // *Nat. Photon.* 2022. Vol. 16. Pp. 422–427 <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01011-0>.
10. Способ многоканального измерения температуры: пат RU № 2775873. С1 / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева // *Изобретения. Полезные модели.* 2022. № 20.
11. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2022. Т. 65. № 4. С. 254–26. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>
12. Kabardin I.K., Pravdina M.K., Gordienko M.R. et al. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube // *J. Engin. Thermophys.* 2022. Vol. 31. Pp. 309–314 <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>.
13. Malinarič, S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters // *Int J Thermophys.* 2024. Vol. 45, 22 <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>.
14. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers // *Int J Thermophys.* 2019. Vol. 40. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.
15. Bondar O.G., Brezhneva E.O. & Pozdnyakov, V.V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor // *Meas Tech.* 2018. Vol. 61. Pp. 514–519 <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1460-z>.
16. Apinai Rerkratn, Supatsorn Prombut, Thawatchai Kamsri, et al. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector // *Sensors.* 2022. Vol. 22. <https://doi.org/10.3390/s22114176>.
17. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Двойных Е. С. Способ измерения температуры: пат RU № 2752132. С1 // *Изобретения. Полезные модели.* 2021. № 21.
18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer // *Meas Tech.* 2022. Vol. 65. Pp. 206–212. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z>.
19. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поляков Н. В. Способ измерения температуры среды: пат RU № 2781754. С1 // *Изобретения. Полезные модели.* 2022. № 29.

20. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Zubarev, A.Y. Improvement of Algorithms for Measuring Temperature with Two-Wire Connection of Resistance Thermometers // *Meas Tech.* 2023. Vol. 66, Pp. 273–278 <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w>.

## References

1. Kasparov K. N., Belozarov A. V. Izmerenie temperatury bystroprotekayushchikh protsessov [Temperature measurement of fast-flowing processes]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, pp. 1256–1263. <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>.

2. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers. *Int J Thermophys*, 2019, vol. 40. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>

3. Kowal A., Manuszkiewicz H., Kołodziej B. et al. Tests of the Stability of Chinese RhFe Resistance Thermometers at Low Temperatures. *Int J Thermophys*, 2017, vol. 38, pp. 38–95. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2232-8>

4. Lapshinov B.A. Metody izmereniya temperatury v tekhnologiyakh sverkhvysokochastotnogo nagreva [Methods of temperature measurement in ultrahigh-frequency heating technologies]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2021, no. 6, pp. 20–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-20-28>.

5. Zhang M., Zhang J., Qiao L., Wang T. Distributed Fiber Optic Raman Thermometer and Applications. In: *Novel Optical Fiber Sensing Technology and Systems. Progress in Optical Science and Photonics*, 2024, vol 28. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-7149-7-6>.

6. Filatov A. V., Serdyukov K. A., Novikova A. A. Perspektivy ispol'zovaniya modifitsirovannogo nulevogo metoda izmerenii temperatury datchikami soprotivleniya [Prospects for the use of a modified zero temperature measurement method by resistance sensors]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2017, vol. 63, no. 7, pp. 567–572. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x>

7. Cheung Y., Jing Z., Liu Q. et al. Fast-Response Fiber-Optic FPI Temperature Sensing System Based on Modulated Grating Y-Branch Tunable Laser. *Photonic Sens*, 2024, vol 14, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s13320-023-0690-0>.

8. Woo K.R., Kim H.B., Kim H.L. et al. An MMC-Based Temperature Control System for a Long-Term Data Collection. *J Low Temp Phys*, 2022, vol. 209, pp. 1218–1225 <https://doi.org/10.1007/s10909-022-02805-w>.

9. Reihani A., Meyhofer E., Reddy P. Nanokelvin-resolution thermometry with a photonic microscale sensor at room temperature. *Nat. Photon*, 2022, vol. 16, pp. 422–427 <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01011-0>.

10. Bondar' O.G., Brezhneva E.O. Sposob mnogokanal'nogo izmereniya temperatury. Patent RU 2775873 C1 [Method of multichannel temperature measurement. Patent RU 2775873 C1]. *Izobreteniya. Poleznye modeli = Inventions. Utility models*, 2022, no. 20.
11. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P. S. Mnogokanal'nyj preobrazovatel' temperatury [Multi-channel temperature converter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 254-261 (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674>
12. Kabardin I.K., Pravdina M.K., Gordienko M.R. *et al.* Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube. *J. Engin. Thermophys*, 2022, vol. 31, pp. 309–314. <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>.
13. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters. *Int J Thermophys*, 2024, vol. 45, 22 <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>.
14. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers. *Int J Thermophys*, 2019, vol. 40. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.
15. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Pozdnyakov V.V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor. *Meas Tech*, 2018, vol. 61, pp. 514–519 <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1460-z>
16. Apinai Rerkratn, Supatsorn Prombut, Thawatchai Kamsri, et al. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector. *Sensors*, 2022, vol. 22. <https://doi.org/10.3390/s22114176>.
17. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Dvoinykh E. S. Sposob izmereniya temperatury: pat RU № 2752132. C1 [Temperature measurement method: PAT RU No. 2752132. C1]. *Izobreteniya. Poleznye modeli = Inventions. Utility models*, 2021, no. 21.
18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer. *Meas Tech*. 2022, vol. 65, pp. 206–212. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z>.
19. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Polyakov N. V. Sposob izmereniya temperatury sredy: pat RU № 2781754. C1. [Temperature measurement method: PAT RU No. 2752132. C1]. *Izobreteniya. Poleznye modeli = Inventions. Utility models*, 2022, no. 29.
20. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Zubarev, A.Y. Improvement of Algorithms for Measuring Temperature with Two-Wire Connection of Resistance Thermometers. *Meas Tech*, 2023, vol. 66, pp. 273–278. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w>.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Бондарь Олег Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

**Oleg G. Bondar**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

**Брежнева Екатерина Олеговна**, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

**Ekaterina O. Brezhneva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

**Ботиков Константин Алексеевич**, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: botikov.03@mail.ru

**Konstantin A. Botikov**, Student of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: botikov.03@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-88-99>

## Ассоциативное поле как модель ментальной репрезентации: когнитивный, эмотивный и языковой аспекты

Н.И. Степыкин <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "МЭИ"  
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, г. Москва 111250, Российская Федерация

✉ e-mail: [nick1086@mail.com](mailto:nick1086@mail.com)

### Резюме

**Цель исследования.** Моделирование ассоциативного поля с целью отражения характера предикации речевого действия, представленного соотношением стимул – реакция, а также выявления доминирующих ментальных опор.

**Методы.** Построение ассоциативного поля основано на данных свободного ассоциативного эксперимента, представленных в русском ассоциативном тезаурусе и словаре ассоциативных норм университета Южной Флориды. Моделирование ассоциативного поля предполагает распределение ассоциатов по характеру предикации для выделения понятийных реакций, ассоциатов-представлений, эмоционально-оценочных и операциональных реакций. Установленное соотношение типов ассоциатов позволяет выявить доминирование когнитивных, эмотивных или языковых опор при продуцировании речевого действия.

**Результаты.** На основе психолингвистического моделирования ассоциативных полей учитель и teacher установлены этнокультурные различия в характере предикации речевых действий: среди американских испытуемых преобладают реакции-представления, среди русских – операциональные ассоциаты. Русские испытуемые опираются в большей мере на языковые ориентиры, а американцы – на когнитивные ориентиры. Эмотивные ориентиры занимают промежуточное место, при этом в составе АП учитель эмоционально-оценочных реакций на 12 % больше, чем в составе АП teacher. Близость психологического значения слов teacher и student обусловлена пересекающимися ассоциатами school, professor, class и book. В русском ассоциативном словаре ассоциативные поля учитель и студент не имеют пересекающихся ассоциатов, что подчёркивает отсутствие для них общих смыслов.

**Заключение.** Проведённое исследование позволило обосновать эффективность и перспективы психолингвистической модели ментальной репрезентации. Определено, что предложенная модель выявляет характер предикации в соотношении стимул – реакция, а также преобладающие ориентиры внутреннего лексикона и признаки, на основе которых осуществляется психологическая предикация.

**Ключевые слова:** ассоциативное поле; ментальная репрезентация; модель; предикация; стимул; реакция.

**Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Степыкин Н.И. Ассоциативное поле как модель ментальной репрезентации: когнитивный, эмотивный и языковой аспекты // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 88-99. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-88-99>.

Поступила в редакцию 21.01.2024

Подписана в печать 15.02.2024

Опубликована 27.03.2024

© Степыкин Н.И., 2024

# Associative Field as a Model of Mental Representation: Cognitive, Emotive and Linguistic Aspects

Nikolay I. Stepykin

<sup>1</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
14, build. 1, Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russian Federation

✉ e-mail: nick1086@mail.com

## Abstract

**Purpose of research.** Modeling of the associative field in order to reflect the nature of the predication of speech action, represented by the cue – target pair, as well as to identify the dominant mental supports.

**Methods.** The construction of the associative field is based on the data of free association tests presented in the Russian associative thesaurus and the University of South Florida Free Association Norms. Modeling of the associative field involves the distribution of associates by the nature of predication to identify conceptual reactions, associates-representations, emotional and evaluative, and operational reactions. The established correlation of the types of associates makes it possible to identify the dominance of cognitive, emotive or linguistic guidelines in the production of speech action.

**Results.** Due to psycholinguistic modeling of the associative fields *uchitel* and teacher ethnocultural difference in the nature of the predication of speech actions was established. Reactions-representations dominate among American respondents, operational associates prevail among Russian ones. Russian speakers rely more on language norms, while Americans rely on cognitive guidelines. Emotive guidelines take an intermediate place between cognitive and linguistic ones. Associative field *uchitel* has 12% more emotional and evaluative reactions in comparison with the field teacher. The close distance of the psychological meaning of the words teacher and student is stipulated by the overlapping associations, such as school, professor, class and book. The associative fields *uchitel* and student do not have overlapping associates, which emphasizes the lack of common psychological meaning.

**Conclusion.** The conducted research made it possible to demonstrate the effectiveness and prospects of the psycholinguistic model of mental representation. It has been determined that the proposed model reveals the nature of predication in the cue – target relationship, as well as the prevailing guidelines of the internal lexicon and signs on the basis of which psychological predication is carried out.

**Keywords:** associative field; mental representation; model; predication; cue; target.

**Conflict of interest.** The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Stepykin N. I. Associative Field as a Model of Mental Representation: Cognitive, Emotive and Linguistic Aspects. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 88-99 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-88-99>.

Received 21.01.2024

Accepted 15.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

## Введение

Одним из базовых понятий когнитивной науки является «ментальная репрезентация». Отмечая междисциплинар-

ность и большую востребованность данного термина в когнитивных, психологических, психолингвистических и лингвокогнитивных исследованиях, Л. В. Лаен-

ко предлагает рассматривать ментальную репрезентацию как «актуальный образ того или иного конкретного события, т.е. субъективную форму видения происходящего. Ментальные репрезентации являются оперативной формой ментального опыта, они изменяются по мере изменения ситуации и интеллектуальных усилий субъекта, являясь специализированной умственной картиной события» [1, с. 11].

Среди моделей ментальной репрезентации в настоящее время выделяют признаковые [2], сетевые [3], коннекционистские [4 – 9], множественные [10 – 12] и др.

Одним из особых вариантов модели ментальной репрезентации является ассоциативное поле (далее АП), которое может быть построено на основе признаковых, сетевых, коннекционистских или каких-либо иных принципах. Примером признаковой модели АП является семантический гештальт Ю.Н. Караулова [13]. Коннекционистские модели строятся на основе схем, включающих слоты, которые соответствуют определённым аспектам ситуации [14]: возможные референты слова-стимула; действия, состояния и характеристики референта слова-стимула; другие субъекты – участники ситуации; действия, состояния и характеристики других субъектов – участников ситуации и др. [15]. В психолингвистическом понимании АП – это «модель ментальной репрезентации, в которой отражена распределительная активация личностного смысла в

понятийных реакциях, реакциях-представлениях, эмоционально-оценочных ассоциатах и операциональных реакциях» [16, с. 111]. Вслед за А.А. Леонтьевым и сторонниками теории речевой деятельности соотношение стимула и реакции мы рассматриваем как речевое действие [17]. Экспериментально доказано, что такой подход к моделированию ассоциативного поля позволяет отразить механизм распределительной активации смысла [18, 19], а также представить многообразие предикативных связей слова<sup>1</sup>. В концепции А. А. Залевской акцентируется, что ассоциативная связь возникает на основе включения «исходного слова в триединый контекст внутреннего лексикона – во взаимопересекающиеся системы когнитивных, эмоциональных и языковых ориентиров, вне которых слово не может функционировать в индивидуальном сознании» [20, с. 11], поэтому при моделировании АП можно говорить о доминировании тех или иных типов ментальных опор, содержащих информацию о языковых и энциклопедических знаниях, эмоционально-оценочных переживаниях индивида и нормах и оценках, выработанных социумом. АП «построено таким образом, чтобы обеспечить пересечение смысловых пространств не только на уровне актуально идентифицируемой части поля, но также и на уровне зон

---

<sup>1</sup> Степыкин Н.И. Речевое действие как психолингвистический механизм порождения и актуализации смысла: автореф. дис. ... д-ра филол. наук. М., 2021. 437 с.

перспективного развития, которые определяют области привлечения дополнительной информации» [21, с. 107]. Эти области образуются на основе пересечения и опосредования ассоциатов в ассоциативно-вербальной сети и могут быть выявлены при обработке и анализе больших массивов данных, полученных в результате свободных ассоциативных экспериментов.

### Материалы и методы

Ассоциативное поле представляет собой модель ментальной репрезентации, которая позволяет отразить характер предикации речевых действий носителей того или иного языка. Первым этапом моделирования ассоциативного поля является выявление понятийных реакций, отражающих инвариантное содержание речевого действия. Содержание понятийных реакций соответствует толкованию лексемы в лексикографических источниках, например, *Россия – страна, стол – мебель, друг – человек* и пр.

Следующий шаг – установление реакций-представлений, образно связанных с понятием, например, *Россия – медведь, Америка – Nike (крэссовки)* и т.п.

Понятийные ассоциаты и реакции представления актуализируются при доминировании когнитивных ориентиров.

Далее необходимо определить эмоционально-оценочные реакции, отражающие эмотивные ориентиры при активации речевого действия (например, *стол – красивый, Америка – житуха!*,

*Америка – пустота* и пр.). Наконец, доминирующие языковые ориентиры приводят к операциональным реакциям (*стол – столы, тёмная ночь, Америка – разлучница* и т.п.).

В ходе моделирования ассоциативного поля также важно установить опосредованные связи: количество пересекающихся ассоциатов и опосредований для анализируемой пары стимул – реакция. Эти связи являются основаниями для ментальной предикации и продуцирования речевого действия.

В качестве материала исследования привлекаются данные русского ассоциативного тезауруса (РАТ) [22], норм ассоциаций университета Южной Флориды (USF) [23] и мультилингвальный ассоциативный тезаурус вежливости [24].

### Результаты и их обсуждение

Ассоциативное поле *учитель*, представленное в РАТ, включает следующие реакции: *истории 6, математики 4, добрый 3, музыки 3, мучитель 3, пения 3, рисования 3, друг 2, женщина 2, злой 2, любимый 2, мой 2, первый 2, плохой 2, преподаватель 2, русского 2, словесности 2, указка 2, ученик 2, хороший 2, авторитет, азбука, алгебры, английского, баба, ботаники, в школе, все, географии, говорит, двоечник, дирижер, достал, дурак, зануда, занятие, Ирка, история, класс, классный, кусок, литература, мужчина в сером костюме, мученик, наставник, не всегда человек, немецкого, немецкого языка, Орлов, отец, пение, пенсне, прав, прекрасный,*

пришел, само, сердечный, скучно, спрашивает, стоит, строгий, учитель, физики, химии, хлястик, человек, школа, шпион, язык; всего реакций на стимул: 102, различных реакций на стимул: 70, одиночных реакций на стимул: 49, отказов: 2<sup>1</sup>.

Смоделируем АП *учитель* по характеру предикации соотношения *стимул – реакция*:

Понятийные реакции: *преподаватель 2, наставник, человек, школа – 5 %*.

Реакции-представления: *женщина 2, указка 2, ученик 2, азбука, все, двоечник, дирижер, занятие, Ирка, история, класс, кусок, литература, мужчина в сером костюме, отец, пение, пенсне, хлястик, язык – 22 %*.

Эмоционально-оценочные ассоциаты: *добрый 3, мучитель 3, злой 2, любимый 2, плохой 2, хороший 2, авторитет, баба, достал, дурак, зануда, класный, мученик, не всегда человек, прав, прекрасный, сердечный, скучно, строгий, шпион – 28 %*.

Операциональные реакции: *истории 6, математики 4, музыки 3, пения 3, рисования 3, друг 2, мой 2, первый 2, русского 2, словесности 2, алгебры, английского, ботаники, в школе, географии, говорит, немецкого, немецкого языка, Орлов, пришел, само, спрашивает, стоит, учитель, физики, химии – 45 %*.

Представим модель АП *учитель*, отражающую характер ментальной предикации, графически (рис. 1).

Распределение реакций позволяет выявить преобладающие ментальные ориентиры говорящих, порождающие речевые действия при предъявлении стимула *учитель* (рис. 2).

При предъявлении стимула *учитель* среди носителей русской лингвокультуры превалируют языковые ориентиры (45 %), что подчёркивает высокую степень операциональности речевых действий, генерируемых на основе этого стимула. Наименее характерными оказались когнитивные ориентиры (22 %), с одной стороны обусловленные инвариантным значением стимула (понятийные реакции), с другой стороны, отражающие личностные смыслы и социальный опыт говорящих (реакции-представления).

Смоделируем характер предикации на материале АП *teacher*, представленного в USF [20].

Понятийные реакции: *school 19, instructor 11, professor 11, instruction, leaders, mentor, scholar, work (32 %)*.

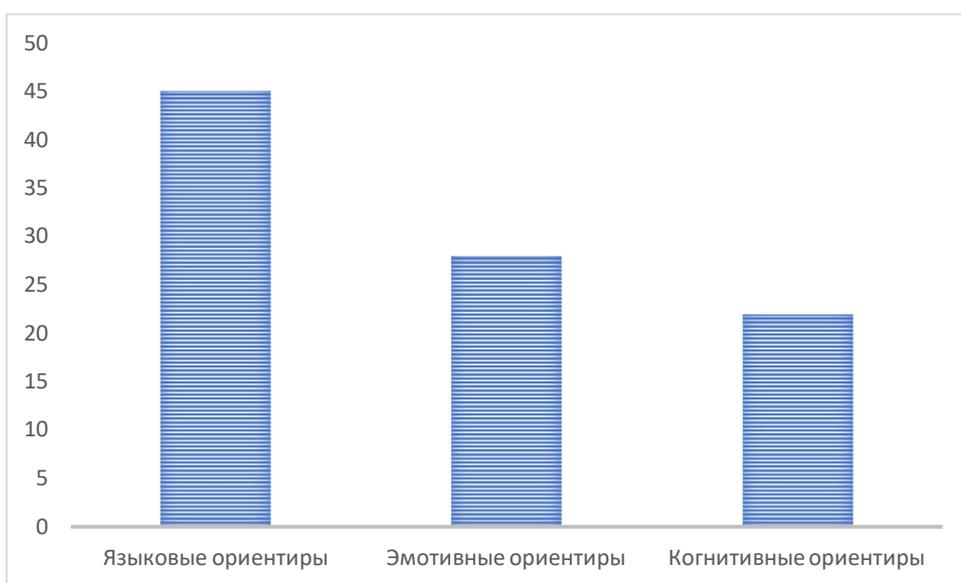
Реакции-представления: *student 28, class 10, learn 10, apple 5, book 2, help 2, blackboard, dad, elementary, grade, History, homework, intelligence, leaders, learned, lecture, Math, mother, old, sleep, speech, test (49 %)*.

<sup>1</sup> Степыкин Н.И. Речевое действие как психолингвистический механизм порождения и актуализации смысла: автореф. дис. ... д-ра филол. наук. М., 2021. 437 с.



**Рис. 1.** Характер ментальной предикации АП *учитель* по данным РАТ

**Fig. 1.** The Nature of Mental Predication of AF *teacher* according to RAT Data



**Рис. 2.** Типология преобладающих ориентиров для говорящих, порождающих речевые действия при предъявлении стимула *учитель*

**Fig. 2.** Typology of the prevailing guidelines for speakers that generate speech actions when presented with a cue *teacher*

Эмоционально-оценочные ассоциации: *friend 6, smart 6, admired, boring, educated, good, important, nice, okay, respect, stern, sting, wise* (16 %).

Операциональные ассоциаты: *teach 3, singer* (3 %).

Графическая модель характера предикации представлена на рис. 3.



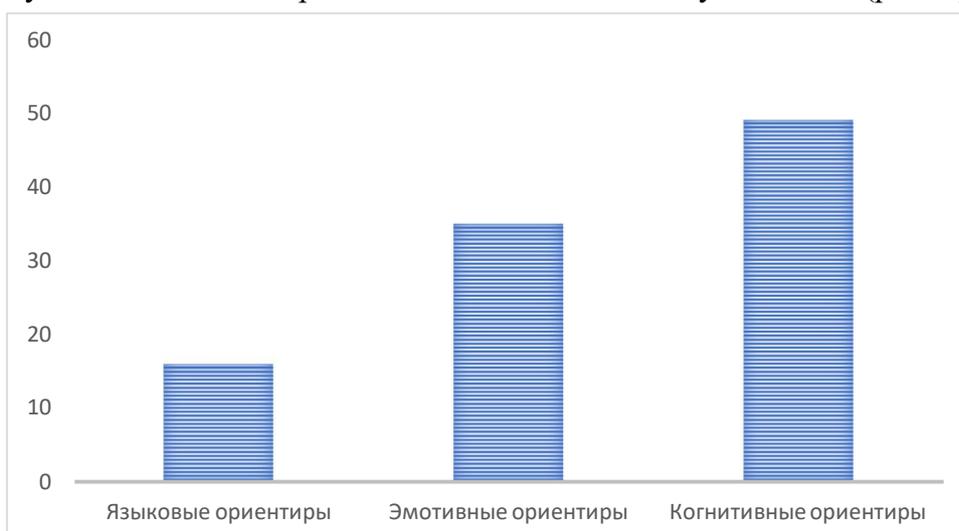
**Рис. 3.** Характер ментальной предикации АП *teacher* по данным USF

**Fig. 3.** The Nature of Mental Predication of AF *teacher* according to USF Data

Анализ смоделированных ассоциативных полей показал, что распределение реакций носителей русского и английского языков на стимулы *учитель/teacher* по соответствующим группам существенным образом отличается. В русской модели АП *учитель* преобладают операциональные реакции (45 % по сравнению с 3 % у американцев), во многом обусловленные инвариантным

значением лексемы и языковыми нормами. У американцев доминируют реакции-представления, репрезентирующие личностные смыслы говорящих, так или иначе связанные со стимулом *teacher* (49 % vs 22 %).

Отобразим преобладающие ментальные ориентиры говорящих, порождающие речевые действия при предъявлении стимула *teacher* (рис. 4).



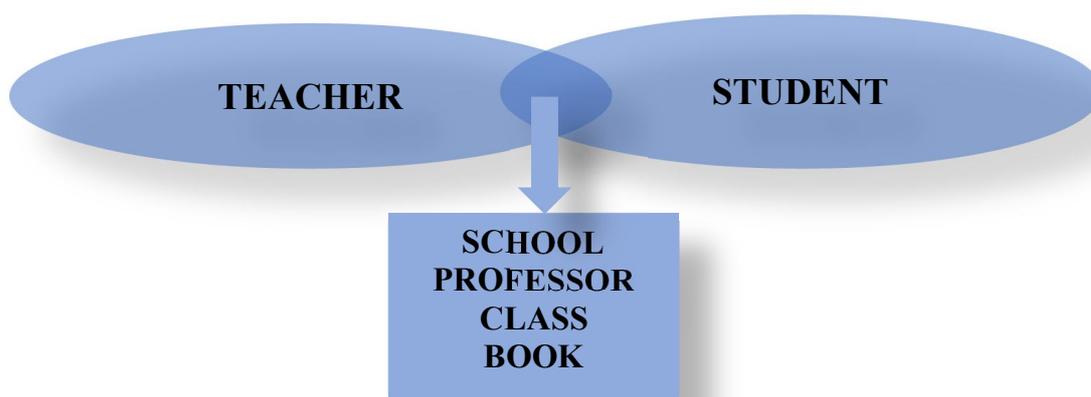
**Рис. 4.** Типология преобладающих ориентиров для говорящих, порождающих речевые действия при предъявлении стимула *teacher*

**Fig. 4.** Typology of the prevailing guidelines for speakers that generate speech actions when presented with a cue *teacher*

Анализ типологии преобладающих ориентиров показал, что при предъявлении стимулов *учитель/teacher* в процессе порождения речевых действий у русских и американцев доминируют принципиально различные ментальные ориентиры: носители русской культуры в большей степени опираются на языковые нормы, продуцируя операциональные реакции (*истории, математики, stout* и пр.), а речевые действия американцев в большей степени связаны со стереотипными ситуациями, что отражается в реакциях-представлениях (*student 28, class 10, learn 10, book 2*).

Важным аспектом моделирования АП является выявление количества пе-

ресекающихся ассоциатов, поскольку помимо непосредственных связей между стимулом и реакцией в ассоциативном эксперименте проявляются косвенные связи, отражающие опосредования и пересечения слов в ассоциативной сети. Эти связи обуславливают близость психологического значения слов. Например, поля слов *teacher* и *student* в американской ассоциативной базе пересекаются по ассоциатам *school, professor, class* и *book*. Эти ассоциаты являются признаками, на основе которых устанавливается близость смыслов, продуцируемых словами *teacher* и *student* для американцев (рис. 5).



**Рис. 5.** Пересечения полей слов *teacher* и *student* по данным USF

**Fig. 5.** Intersections of the fields of the words *teacher* and *student* according to USF data

В РАТ ассоциативные поля *учитель* и *студент* не пересекаются, что говорит об отсутствии выявленных признаков для предсказания соотношения *учитель – студент* в ассоциативном эксперименте.

### Выводы

Проведённое исследование показало потенциал АП как психолингвисти-

ческой модели ментальной репрезентации. Моделирование ассоциативных полей слов *учитель* и *teacher* позволило установить различия в характере предикации речевых действий, входящих в их состав: в американской модели АП преобладают реакции-представления, а в русской – операциональные реакции. В связи с этим можно заключить, что при продуцировании речевого действия, ак-

тивированного стимулом *учитель*, русские испытуемые в большей степени опирались на языковые ориентиры, а американцы при предъявлении стимула *teacher* в основном полагались на когнитивные ориентиры. Эмотивные опоры у русских и американцев оказались промежуточным звеном между когнитивными и языковыми, при этом доля эмоционально-оценочных реакций русских респондентов значительно больше (28 % vs 16 %). Моделирование АП позволяет также выявить основания для

ментальной предикации. Активация соотношения *teacher – student* в американском ассоциативном словаре обусловлена пересекающимися ассоциатами *school, professor, class* и *book*. В РАТ соотношение *учитель – студент* не актуализировано, при этом пересекающихся ассоциатов для него также не было выявлено, что подчёркивает этнокультурную специфику ментальной репрезентации представителей русской и американской лингвокультур.

### Список литературы

1. Лаенко Л. В. Категория ментальной репрезентации: результаты теоретического и методологического поиска // Вестник ВГУ. Сер. «Лингвистика и межкультурная коммуникация». 2007. № 1. С. 5–12.
2. Wierzbicka A. Lexicography and conceptual analysis. Ann Arbor, 1985. 340 p.
3. Клацки Р. Память человека. М.: Мир, 1978. 319 с.
4. Дисмор А. Ментальные пространства с функциональной точки зрения // Язык и интеллект / под ред. В. И. Герасимова и В. П. Нерознака. М.: Прогресс, 1996. С. 385 – 411.
5. Норман Д. Память и научение. М.: Мир, 1985. 320 с.
6. Barsalou L.W. Frames, concepts, and conceptual fields / Frames, fields, and contrasts. Hillsdale, 1992. P. 21 – 74.
7. Fauconnier G. Mental spaces: aspects of meaning construction in natural language. Cambridge, 1994. 190 p.
8. Fauconnier G. Blending as a central process in grammar // Conceptual structure, discourse and language / A. Goldberg (ed.). Stanford: CSLI, 1996. Pp. 183 – 203.
9. Lakoff G. Women, fire and dangerous things. What categories reveal about the mind. Chicago: The University of Chicago Press, 1987.
10. Dual coding perspective on encoding processes / J. M. Clark, A. A. Paivio, McDaniel M., Pressley M. (Eds.) // Imagery and related Mnemonic Process. Theories, Individual Differences, and Applications. 1987. Pp. 5 – 33.
11. Eysenck M. W., Kean M. T. Cognitive psychology. Hove, Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1997. 542 p.
12. Gati. I., Tversky A. Similarity, seperability, and the triangle inquality // Ps. Rev. 1982. Vol. 89. Pp. 123 – 154.



## References

1. Laenko L. V. Kategorija mental'noj reprezentacii: rezultaty teoreticheskogo i metodologicheskogo poiska [The category of mental representation: the results of theoretical and methodological search]. *Vestnik VGU. Ser. «Lingvistika i mezhkul'turnaya kommunikatsiya» = Bulletin of the VSU. Ser. "Linguistics and intercultural communication"*, 2007, no. 1, pp. 5-12.
2. Wierzbicka A. *Lexicography and conceptual analysis*. Ann Arbor, 1985, 340 p.
3. Klatzky R. *Pamjat' cheloveka* [Human memory]. Moscow, Mir Publ., 1978. 319 p.
4. Dismor A. [Mental spaces from a functional point of view]. *Jazyk i intellect* [Language and intelligence]; ed. by V. I. Gerasimov and V. P. Neroznak. Moscow, Progress Publ., 1996, pp. 385 – 411 (In Russ.).
5. Norman D. *Pamjat' i nauchenie* [Memory and learning]. Moscow, Mir Publ., 1985. 320 p.
6. Barsalou L.W. *Frames, concepts, and conceptual fields. Frames, fields, and contrasts*. Hillsdale, 1992, pp. 21 – 74.
7. Fauconnier G. *Mental spaces: aspects of meaning construction in natural language*. Cambridge, 1994. 190 p.
8. Fauconnier G. Blending as a central process in grammar, A. Goldberg (ed.), *Conceptual structure, discourse and language*. Stanford: CSLI, 1996, pp. 183 – 203.
9. Lakoff G. *Women, fire and dangerous things. What categories reveal about the mind*. Chicago: The University of Chicago Press, 1987.
10. Clark J. M., Paivio A. A., McDaniel M., Pressley M. (Eds). Dual coding perspective on encoding processes. *Imagery and related Mnemonic Process. Theories, Individual Differences, and Applications*. 1987, pp. 5 – 33.
11. Eysenck M. W., Kean M. T. *Cognitive psychology*. Hove, Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1997. 542 p.
12. Gati. I., Tversky A. Similarity, separability, and the triangle inequality. *Ps. Rev.* 1982, vol. 89, pp. 123 – 154.
13. Karaulov Ju. N. [Semantic gestalt of the associative field and images of consciousness]. *Yazykovoe soznanie: sodержanie i funkcionirovanie: tezisy dokl. XIII Mezhdunar. simp. po psiholingvistike i teorii kommunikacii* [Linguistic consciousness: content and functioning. Abstracts of the XIII International Conference. simp. in psycholinguistics and communication theory]. Moscow, 2000, pp. 107-109 (In Russ.).
14. Mironova N. I. Associativnyj jeksperiment: metody analiza dannyh i analiz na osnove universal'noj shemy [Associative experiment: methods of data analysis and analysis based on a universal scheme]. *Voprosy psiholingvistiki = Issues of Psycholinguistics*, 2014, no. 2, is. 14, pp. 108-119.
15. Mironova N. I. Kognitivnyj podhod k sodержatel'nomu analizu reakcij associativnogo polja: shema [Cognitive approach to the meaningful analysis of the reactions of the

associative field: scheme]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Chelyabinsk State University*, 2008, no. 20, pp. 69 – 79.

16. Stepykin N.I. Comparative Analysis of the Associative Fields Вежливость and Вежливост. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i pedagogika = Proceedings of the Southwest State University. Series: Linguistics and Pedagogy*. 2022;12(1):104-112. (In Russ.)

17. Leont'ev A.A. *Yazyk, rech', rechevaya deyatel'nost'* [Language, speech, speech activity]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1969. 214 p.

18. Pishchalnikova V. A., Stepykin N. I. Speech action as realization of the psychological meaning (based on the associative field of the lexeme citizen). *Vestnik of Moscow State Linguistic University. Humanities*, 2023, 9(877), 41–48. [https://doi.org/10.52070/2542-2197\\_2023\\_9\\_877\\_41](https://doi.org/10.52070/2542-2197_2023_9_877_41)

19. Pishchalnikova V. A. Interpretation of Associative Data as a Methodological Issue of Psycholinguistics. *Russian Journal of Linguistics*, 2019, 23 (3), 749—761. <https://doi.org/10.22363/2312-9182-2019-23-3-749-761>.

20. Zalevskaja A. A. [Functional basis for the differentiation of paradigmatic and syntagmatic connections in the analysis of materials of associative experiments]. *Strukturno-semanticheckie issledovaniya russkogo jazyka* [Structural and semantic studies of the Russian language]. Voronezh, Voronezh University Publ., 1994, pp. 5-13 (In Russ.).

21. Zalevskaja A. A. [The meaning of the word and the possibilities of its description]. *Jazykovoje soznanie: formirovanie i funkcionirovanie. Sbornik statej* [Linguistic consciousness: formation and functioning. Collection of articles]; ed. by N.V. Ufimtseva. Moscow, 1998, pp. 35-54 (In Russ.).

22. Karaulov Ju. N., Sorokin Ju. A., Tarasov E. F. [et al.]. *Russkij asociativnyj tezaurus* [Russian associative thesaurus]. Available at: <http://thesaurus.ru/dict/> (accessed: 25.12.2023)

23. Nelson D. L., McEvoy C. L., Schreiber T. A. The University of South Florida Word Association, Rhyme, and Word Fragment Norms. Available at: <http://w3.usf.edu/FreeAssociation> (accessed 25.12.2023).

24. Stepykin N. I., Mironova D. M. *Proekt mul'tilingval'nogo asociativnogo tezaurusa vezhlivosti* [The project of a multilingual associative thesaurus of politeness]. Kursk, 2020. 205 p.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

Степыкин Николай Иванович, доктор филологических наук, Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Российская Федерация, e-mail: [nick1086@mail.com](mailto:nick1086@mail.com)

Nikolay I. Stepykin, Dr. of Sci. (Philological), National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation, e-mail: [nick1086@mail.com](mailto:nick1086@mail.com)

## О программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базированных систем

Н.С. Карамышева<sup>1</sup>, А.С. Милованов<sup>1</sup>, М.А. Митрохин<sup>1</sup>, С.А. Зинкин<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет  
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, российская федерация

✉ e-mail: zsa49@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Целью работы является разработка рекомендаций по программной реализации когнитивных агентно-базированных систем, обеспечивающих интероперабельность при взаимодействии программных когнитивных агентов, обладающих различными свойствами. Программная реализация, определяющая семантическую близость на основе машинного обучения, выделяет ключевые понятия, строит ассоциации, упрощая и ускоряя процесс работы с текстовыми данными в процессе диалога агентов, одним из которых является человек. Предлагаемый подход основан на предположении, что компьютерные системы могут выполнять некоторые «антропоморфные» функции, похожие на способности человека мыслить.

**Методы.** Знания о предметной области определяются на основе обучения искусственной нейронной сети. Для обозначения семантики реплик и другой информации предложено использовать тегирование и определение семантической близости ключевых фраз из речей, представленных в письменной форме.

**Результаты.** Система была реализована на языке программирования Python. В качестве нейросетевой модели векторизации текста использовалась модель Word2Vec с архитектурой Skip-gram. Для обучения использовались два текстовых набора с информацией о компьютерной науке и зоологии. По результатам сравнения текстов двух тематик можно судить о работоспособности системы определять семантическую близость текстовой информации.

**Заключение.** Положенная в основу программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базированных систем подсистема определения семантической близости текстовой информации на основе технологий машинного обучения позволяет повысить эффективность существующих или разрабатываемых приложений, в работе которых задействован большой объем текстовой информации.

**Ключевые слова:** когнитивные агенты; мультиагентные системы; диалоговые системы; семантическая близость фраз; антропоморфизм; нейросетевая модель; машинное обучение; программная реализация.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** О программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базированных систем / Н.С. Карамышева, А.С. Милованов, М.А. Митрохин, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 100-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-100-122>.

Поступила в редакцию 08.02.2024

Подписана в печать 04.03.2024

Опубликована 27.03.2024

© Карамышева Н.С., Милованов А.С., Митрохин М.А., Зинкин С.А., 2024

## On the Software Implementation of Cognitive Interoperable Agent-Based Systems

Nadezhda S. Karamysheva <sup>1</sup>, Anton S. Milovanov <sup>1</sup>,  
Maksim A. Mitrokhin <sup>1</sup>, Sergey A. Zinkin <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Penza State University  
40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: zsa49@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of the work is to develop recommendations for the software implementation of cognitive agent-based systems that ensure interoperability in the interaction of software cognitive agents with different properties. A software implementation that determines semantic proximity based on machine learning can automatically and quickly highlight important key concepts and find associations, simplifying and speeding up the process of working with text data during a dialogue between agents, one of which is a human. The proposed approach is based on the assumption that computer systems can perform some “anthropomorphic” functions, similar to human ability to think.

**Methods.** Domain knowledge is determined by training an artificial neural network. To indicate the semantics of remarks and other information, it is proposed to use tagging and determining the semantic proximity of key phrases from speeches presented in written form.

**Results.** The system was implemented in the Python programming language. The Word2Vec model with Skip-gram architecture was used as a neural network model for text vectorization. For training, two text sets with information about computer science and zoology were used. Based on the results of comparing texts on two topics, one can judge the performance of the system to determine the semantic proximity of textual information.

**Conclusion.** The subsystem for determining the semantic proximity of text information based on machine learning technologies, which forms the basis for the software implementation of cognitive interoperable agent-based systems, will improve the efficiency of existing or developed applications that involve a large amount of text information.

**Keywords:** cognitive agents; multi-agent systems; dialogue systems; semantic proximity of phrases; anthropomorphism; neural network model; machine learning; software implementation.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Karamysheva N. S., Milovanov A. S., Mitrokhin M. A., Zinkin S. A. On the Software Implementation of Cognitive Interoperable Agent-Based Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 100-122 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-100-122>.

Received 08.02.2024

Accepted 04.03.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

### Введение

Под когнитивным стилем познавательной деятельности человека обычно подразумевают особенности его интел-

лектуального поведения. Когнитивный стиль лежит в основе и определяет результат любого познавательного процесса [1, 2].

При анализе когнитивного стиля познавательной деятельности, отражаемой во взаимодействии обучающего (например, преподавателя вуза) и обучающегося (например, студента) удобно воспользоваться специальными абстракциями для обозначения акторов (деятелей, активностей) определенного рода – так называемых агентов [3]. Когнитивные агенты могут моделировать объекты живой или неживой природы, способные «рассуждать», «принимать решения» и «действовать» [4].

Учет когнитивных стилей, как следует, например, из опубликованных ранее работ [5, 6, 7], позволяет повысить результативность образовательного процесса за счет учета индивидуальных способностей студентов.

Когнитивным агентом может быть человек, робот-автомат или программа. Разнообразие компетенций интеллектуальных когнитивных агентов вызвано тремя видами презумпций [7, 8, 9] – дедуктивными презумпциями, связанными с тем, каким образом в базовой (немодалной) системе задано определение логического следования; эпистемическими презумпциями — знаниями, убеждениями, включающими компетенции агентов по доступу к информации и ее хранению, а также способностями модифицировать множество своих убеждений; целевыми презумпциями, или интенциями и предпочтениями, влияющими на действия и поведение агентов.

## Материалы и методы

*Эпистемические, целевые и дедуктивные презумпции когнитивных и реактивных агентов.* Дедуктивным презумпциям агентов соответствуют дедуктивные умозаключения, в которых переход от общего знания к частному является логически необходимым. Эпистемические презумпции определяют знания агентов об окружении (предметной области, области экспертизы) и о других агентах и их когнитивных презумпциях; целевые презумпции связаны с практическими рассуждениями и содержат цели, намерения и желания агентов во взаимодействии и моделируется в рамках BDI-логики [3, 4, 7, 8, 9, 10].

Цитируя, например, статью [10], опишем модель BDI-логики: «Модель убеждений, желаний и намерений (англ. Belief, Desire, and Intention – BDI-model) – это известная модель программирования интеллектуальных агентов. Убеждения (Belief), в отличие от знаний, описывают степень субъективной информированности агента об окружающем мире (включающем также его самого и прочих агентов). Набор убеждений хранится в базе данных – в так называемой базе убеждений. Желания (Desire) отражают мотивационное состояние агента и представляют собой цели или ситуации, которых агент желал бы достичь. Цель – это желание, выбранное агентом к исполнению. Намерения (Intention) отражают осознанный выбор агента, то есть тот план, который агент предпочел выполнять.

Намерения – это те желания которые агент вменил себе в обязанность».

Различают когнитивные и реактивные агенты. На самом деле классификация агентов, в том числе программных, достаточно велика, но в настоящей работе мы ограничиваемся двумя упомянутыми видами агентов по степени обладания ими когнитивными (эпистемическими или целевыми) свойствами. Подробные описания типов агентов и мультиагентных систем дано в работах [3, 4, 11, 12, 13]. Когнитивный агент – это агент, способный воспринимать информацию и интерпретировать ее в соответствии со своей моделью знаний [14, 15]. Реактивный агент, в отличие от когнитивного агента, обладает ограниченными когнитивными свойствами или не обладает ими вовсе. При поступлении входной информации реактивный выдает на выходе некоторую типовую реакцию, заложенную в него вызывающим агентом или внешней средой [14, 16].

Уточняя использованные термины, отметим, что понятие «Когнитивный агент» в целом соответствует понятию «Интеллектуальный агент». Реактивный агент в принципе может обладать некоторым набором простых когнитивных функций. Однако его работа жестко привязана к окружающей среде, в том числе, возможно, и к другим агентам. Реактивный агент может обладать развитыми коммуникационными способностями, а его работа может быть описана при помощи аппарата конечных

автоматов и сетей Петри. Работа реактивного агента может быть описана также семантической сетью с событиями, сетью фреймов, системой продукций, пригодными для представления дедуктивных презумпций. Таким образом, можно без ограничения общности считать, что когнитивный и реактивный агенты различаются по составу и количеству реализуемых когнитивных и дедуктивных презумпций.

*Антропоморфные презумпции когнитивных агентов.* Есть полное основание считать модель убеждений, желаний и намерений BDI-логики результатом исследования проблемы антропоморфизма. Приведем определение из работы [17], известное также и из других источников: «Антропоморфизм – (греч. anthropos «человек» и morphe «вид, форма»)» – это мировоззренческая форма, фиксируемая главным образом в языке, в которой происходит процесс «переноса» качеств человека и качеств природной стихии друг на друга».

Человек в человеко-машинных (эргатических) системах, таких как справочные системы, интеллектуальные чаты, различные клиент-серверные архитектуры, гибкие автоматизированные производства и во многих других приложениях с использованием методов искусственного интеллекта реализует собственные когнитивные презумпции. Из числа этих презумпций можно выделить часть, которые могут быть реализованы в интеллектуальных человеко-машинных системах.

*Основные когнитивные презумпции человека.* Рассматриваемый состав данных презумпций выбран из источников [18, 19]) и проиллюстрирован концептуальным графом, представленным на рис. 1.

Концептуальный граф отличается от обычных графов классификаций тем, что он представляет собой графическую форму записи высказываний в первопорядковой логике предикатов [20]. Психические процессы, представленные на графе, разделены на четыре группы (на самом деле групп больше, но в дополнительных группах было бы трудно интерпретировать когнитивные презумпции как антропоморфные). Предикаты и одноименные отношения *Группа\_1*, *Группа\_2*, *Группа\_3* и *Группа\_4* определяют принадлежность элементов групп когнитивных презумпций к их общему числу (отношения типа «множество – подмножество»). Предикат и одноименное отношение *Элем* определяет принадлежность конкретных когнитивных презумпций к числу элементов определенной группы (отношение типа «множество – элемент множества»).

Когнитивными эпистемическими презумпциями считаются презумпции, представляющие знания агентов о положении дел и о других агентах и их когнитивных презумпциях, а также убеждения агентов и способности агентов, влияющие на способы получения, хранения и изменения информации, в частности *знаний* и *убеждений* [7, 8, 9]. Некоторые презумпции отражают практически одни и те же понятия. Например,

*убеждение, мнение* и *знание* могут обозначать одно и то же, если все эти презумпции представляют субъективное *мнение* одного и того же агента. С другой стороны, *знание* в стандартной эпистемической логике не может быть ложным [21, 22]. Некоторые презумпции могут быть отнесены и к другим группам. Например, презумпции *желание* и *намерение* можно отнести к эмоционально-волевой сфере. В общем случае когнитивные функции *убеждений, желаний* и *намерений* агента определяют, каким образом следует интерпретировать для него уже сформированные ранее дедуктивные умозаключения.

*Автоматическое формирование базы знаний.* На основании концептуального графа на рис. 1 можно создать базу знаний о когнитивных презумпциях модели агента-человека, которую в дальнейшем можно использовать при организации диалога человека с интеллектуальной программой, или с программным агентом:

Base\_1: Human Agent Software Model.

Группа\_1(Психические\_процессы,\_состояния\_и\_свойства, Познавательная\_сфера).

Группа\_2(Психические\_процессы,\_состояния\_и\_свойства, Эмоционально\_волевая\_сфера).

Группа\_3(Психические\_процессы,\_состояния\_и\_свойства, Психические\_свойства).

Группа\_4(Психические\_процессы,\_состояния\_и\_свойства, Психические\_образования).

Элем(Познавательная\_сфера, Внимание).

Элем(Познавательная\_сфера, Воображение).

Элем(Познавательная\_сфера, Восприятие).

Элем(Познавательная\_сфера, Мышление).

Элем(Познавательная\_сфера, Ощущения).  
 Элем(Познавательная\_сфера, Память).  
 Элем(Познавательная\_сфера, Представления).  
 Элем(Познавательная\_сфера, Речь).  
 Элем(Психические\_образования, Взгляды).  
 Элем(Психические\_образования, Желания).  
 Элем(Психические\_образования, Знания).  
 Элем(Психические\_образования, Мнения).  
 Элем(Психические\_образования, Навыки).  
 Элем(Психические\_образования, Намерения).  
 Элем(Психические\_образования, Опыт).  
 Элем(Психические\_образования, Привычки).  
 Элем(Психические\_образования, Суждения).  
 Элем(Психические\_образования, Убеждения).  
 Элем(Психические\_образования, Умения).  
 Элем(Психические\_образования, Установки).  
 Элем(Психические\_свойства, Направленность).  
 Элем(Психические\_свойства, Способности).  
 Элем(Психические\_свойства, Темперамент).  
 Элем(Психические\_свойства, Характер).  
 Элем(Эмоционально\_волевая\_сфера, Воля).  
 Элем(Эмоционально\_волевая\_сфера, Эмоции\_ (чувства)).

Использование базы фактов о когнитивной сфере агента позволяет улучшить диалог человека с программным агентом. Для учета эпистемических и целевых презумпций организуется использование тегов и ключевых слов или фраз, которые используются программным агентом-собеседником в диалоге человек-машина.

Для программной реализации когнитивного антропоморфного агента рекомендованы следующие факты:

Base\_2: Programmable Anthropomorphic Cognitive Agent.

Элем(Познавательная\_сфера, Внимание).  
 Элем(Познавательная\_сфера, Восприятие).

Элем(Познавательная\_сфера, Мышление).  
 Элем(Познавательная\_сфера, Память).  
 Элем(Познавательная\_сфера, Речь).  
 Элем(Психические\_образования, Желания).  
 Элем(Психические\_образования, Знания).  
 Элем(Психические\_образования, Мнения).  
 Элем(Психические\_образования, Навыки).  
 Элем(Психические\_образования, Намерения).  
 Элем(Психические\_образования, Опыт).  
 Элем(Психические\_образования, Привычки).  
 Элем(Психические\_образования, Суждения).  
 Элем(Психические\_образования, Убеждения).  
 Элем(Психические\_образования, Умения).

В обоих случаях неявно заданные коммуникативные функции реализуются через презумпцию *речи*, которая относится к речевым психическим познавательным процессам и включает *слушание, говорение, письмо, чтение*. По количеству участников речевой деятельности различают *монолог, диалог и полилог*.

*Принципы программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базируемых систем.* Целью создания программной реализации является обеспечение интероперабельности когнитивных и реактивных агентов в целях реализации на этой основе различных систем, возможно, человеко-машинных, где одной или несколькими сторонами интеллектуального диалога может быть человек. Для обеспечения взаимодействия агентов возможно использование естественного языка, как наиболее привычного и универсального способа общения в системе, где агентами выступают люди. При этом возникает ряд проблем во взаимодействии

агентов-людей с агентами-программами, вызванных слабой формализацией естественного языка.

Частично снять подобные проблемы возможно, используя для участни-

ков диалога «человек – программный агент» конструируемые при помощи нейронной сети на основании взаимных когнитивных презумпций наборы взвешенных и тегированных реплик.

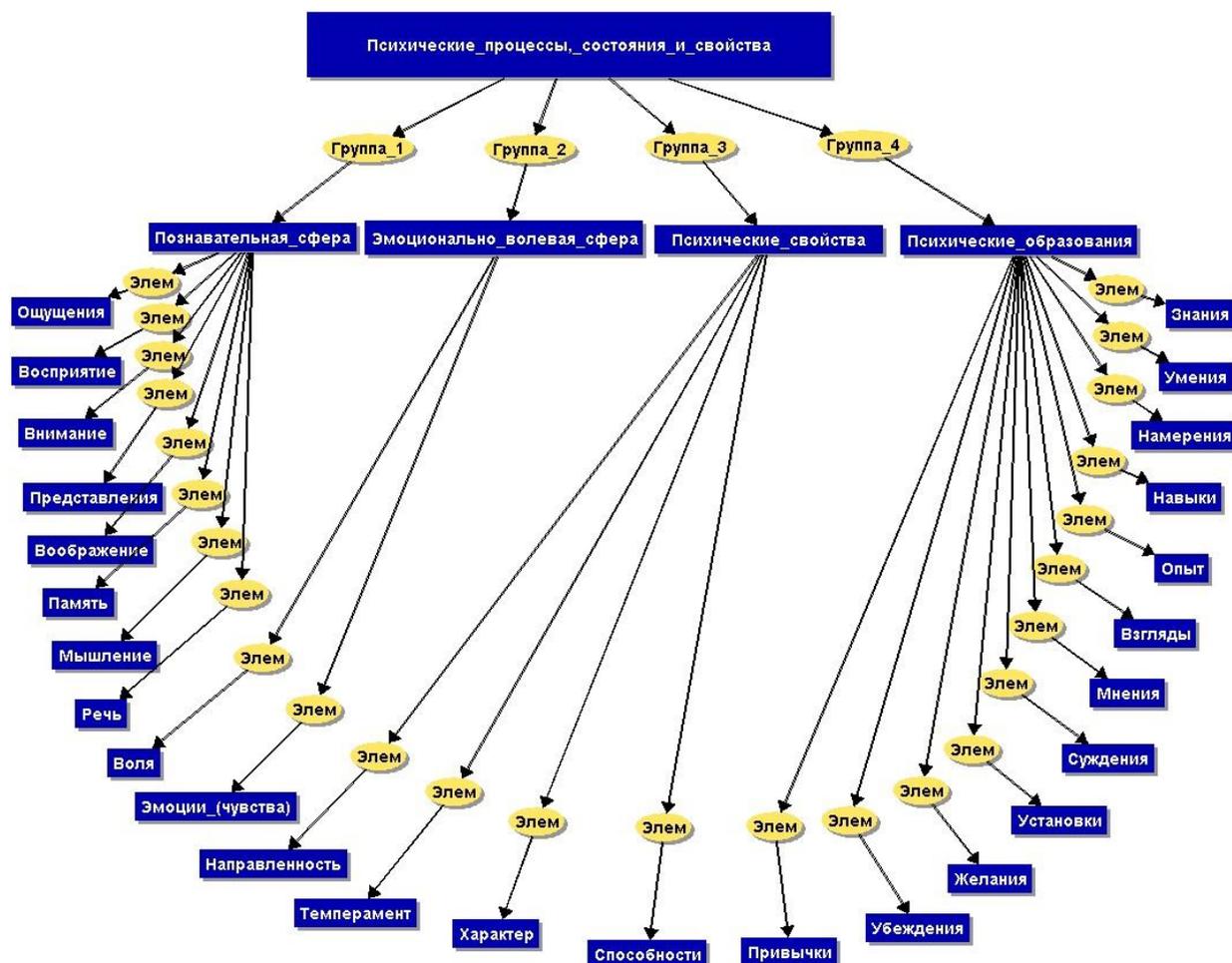


Рис. 1. Концептуальный граф когнитивных презумпций агента-человека

Fig. 1. Conceptual graph of cognitive presumptions of a human agent

*Основные известные концепции, используемые при разработке системы:*

1. Векторизация и тегирование текста. Полная модель языка представляет сложное взаимодействие регулярностей, нерегулярностей, зон исключений и других явлений [23]. Фразы естественного языка (например, слова, предложения, текстовые документы) требуется преобразовать в

числовые формы, так как компьютер не может понимать смысл различных слов и их семантику как человек. Чтобы сделать текстовые документы машиночитаемыми, используется процесс векторизации, который определяется как преобразование текстового документа в цифровой вектор, и представляет собой процесс извлечения признаков из текста [24, 25].

2. Определение схожести текстов. При векторном представлении текстов можно использовать метрики близости векторов [26]. Наиболее известным и часто используемым методом для вычисления подобия семантической близости текстов считается косинусная мера<sup>1</sup>. Используя косинусную меру, можно определить, насколько два текста близки по содержанию. Для двух векторов  $A$  и  $B$  косинусное сходство вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \text{cosine similarity}(A,B) &= \frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  являются векторами,  $A_i$  и  $B_i$  являются компонентами этих векторов  $A$  и  $B$  соответственно. Выделяются три основных случая для косинусного сходства.

2.1. Если подобие  $(A, B) = 0$ , т. е. угол между векторами  $= 90^\circ$ , то это означает, что между двумя текстами очень мало сходства.

2.2. Если подобие  $(A, B) = -1$ , т. е. угол между векторами  $= 180^\circ$ , то это означает, что два текста полностью не похожи.

2.3. Если подобие  $(A, B) = 1$ , т. е. угол между векторами  $= 0^\circ$ , то это означает, что два текста очень похожи друг на друга.

3. Извлечение семантических связей между словами текста. Некоторые нейросетевые модели обработки текстов, та-

кие как *Word2vec*, *SentenceToVec*, *Doc2Vec*, *ELMO*, *BERT*, *FastText* [27] построены на принципах обучения, позволяющих извлекать семантические связи в тексте. Выбор используемой модели зависит от размера данных, специфики задачи и требований к точности и интерпретируемости результатов. Так, например, модель *FastText* позволяет эффективно работать с редко встречающимися словами, а также с опечатками и различными грамматическими формами, а модель *Word2Vec* обучается на основе контекста каждого слова, сохраняя семантические связи между словами даже в длинных последовательностях [28].

*Архитектура системы на основе нейросети.* Архитектура предлагаемого варианта реализации системы представлена на рис. 2. Для работы требуется наличие модуля внешнего взаимодействия, который позволит произвести интеграцию в уже существующие приложения и системы или сделать будущие разработки с использованием данной системы более гибкими и эффективными. В данный модуль поступают запросы с различными наборами текстов (возможно, реплики агентов-участников диалога). В качестве основы для внешнего взаимодействия используются *API* и шина данных [29].

Модуль формирования обучающих данных, связанный с пополняемой базой знаний, выполняет критически важную роль в обеспечении точных и эффективных результатов обработки текстовой информации с помощью нейросетевого модуля. Этот модуль позволяет форми-

<sup>1</sup> URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Векторная\\_модель/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Векторная_модель/) (Дата обращения: 02.12.2023).

ровать данные для дообучения программного агента.

Нейросетевой модуль реализует основную функционал извлечения признаков из текста. Результатом работы данного модуля является массив векторов для соответствующих слов, которые

были задействованы в процессе обучения. Данное векторное пространство должно храниться в векторном словаре, так как для получения векторного представления слов достаточно обучить нейросетевую модель лишь один раз.

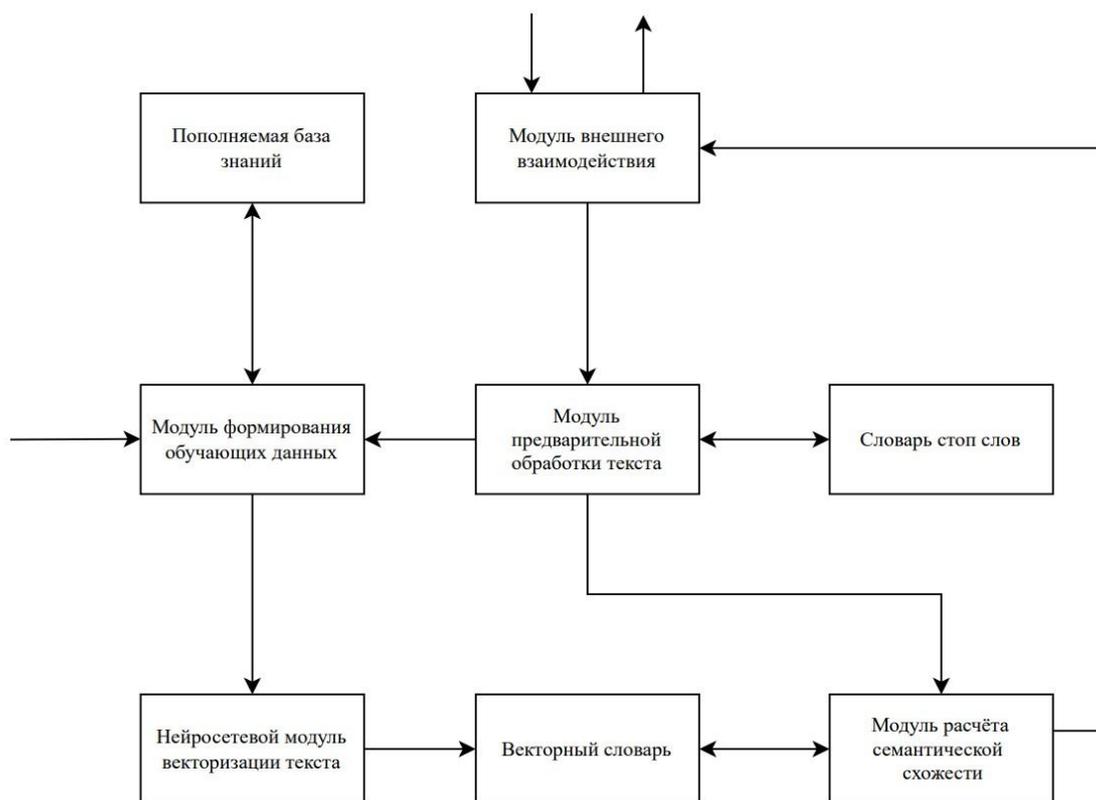


Рис. 2. Архитектура программного когнитивного агента

Fig. 2. Architecture of software cognitive agent

Модуль расчета семантической схожести сопоставляет поступающий набор слов с имеющимися векторными представлениями, хранящимися в векторном словаре. На основе векторных представлений производится расчет семантической схожести, который затем с помощью модуля внешнего взаимодействия отправляется различным получателям. В реализованной системе имеется модуль для реализации конвейера предварительной обработки текста.

Конвейер предварительной обработки текста реализует последовательность действий, применяемых к исходной текстовой информации с целью привести ее к виду, более подходящему для дальнейшего анализа и обработки алгоритмами машинного обучения [30].

В модуле предварительной обработки текста производится избавление от несущественных для анализа символов, таких как знаки препинания, цифры, технические разделители и лишние

пробелы. В большинстве случаев эти данные могут быть удалены без большой потери текстового контекста [31].

Затем из текстовой информации удаляются стоп-слова. Чаще всего стоп-слова – это слова, которые не несут большой информативной нагрузки. Такие слова, как «а» и «и», с большой долей вероятности, не оказывают большего влияния в задачах естественной обработки языка. Следовательно, можно произвести удаление стоп-слов, чтобы сэкономить время вычислений и затрат памяти при обработке больших объемов текста. Для повышения быстродействия обработки обязательно необходимо наличие внутрисистемного словаря, в котором хранится информация о существующих стоп-словах [32].

Лемматизация превращает слова в их каноническую (словарную) форму, учитывая морфологические особенности [33]. С помощью лемматизации возможно уменьшить размерность векторного словаря без значительной потери определения семантической схожести. Предварительную обработку текста должна проходить текстовая информация, поступающая в модуль формирования обучающих данных, и информация, поступающая в модуль внешнего взаимодействия.

*Программная реализация системы на основе нейронной сети.*

В качестве примера реализации программного агента по обозначенным ранее принципам рассмотрим реализацию программного агента, который ин-

тегрирован в «Автоматизированную систему планирования учебных занятий преподавателей вуза» [34]. Программным агентом в этой системе является модуль, реализующий функционал интеллектуального помощника, который позволяет оценить близость научных интересов преподавателя к преподаваемым дисциплинам для повышения эффективности планирования учебной нагрузки и повышения качества преподаваемых дисциплин.

Входными данными для анализа интеллектуальным помощником является информация о научной деятельности преподавателя (статьи, диссертации, выпускные квалификационные работы его студентов и др.) и рабочие программы учебных дисциплин. Выходной информацией является ранжированный по степени близости научным интересам преподавателя список учебных дисциплин.

В качестве языка программирования для создания модели *Word2Vec* использовался язык *Python* и библиотека *NumPy* [35], примененная при работе с массивами и матрицами числовых данных. UML-диаграммы основных классов представлены на рис. 3, рис. 4 и рис. 5.

В качестве нейросетевой модели для векторизации текстовой информации была выбрана модель *Word2Vec* с архитектурой *Skip-gram* [36]. Класс *Word2vecSkipGram* хранит в себе две матрицы весов первого и второго слоя нейросети. Имеется метод *forward* для реализации прямого прохода. Данный

метод возвращает значения выходов всего вычислительного графа нейросетевой модели, так как они будут необходимы для формирования градиента методом обратного распространения ошибки [37]. Данные с выходного слоя преобразуются в распределение вероятности с помощью функции *softmax* [38]. В качестве функции потерь использовалась кросс-энтропия.

Общее уравнение кросс-энтропии имеет вид, представленный следующей формулой [39]:

$$\text{loss} = -\sum_{i=1}^N y_i \cdot \log(\hat{y}_i), \quad (2)$$

где  $N$  – общее количество выборок,  $y_i$  – ожидаемый результат для  $i$  выборки,  $\hat{y}_i$  – прогнозируемый результат для  $i$ -й выборки.

За обучение модели отвечает класс *Learner* [40], который выполняет обучение нейросети путем минимизации ее функции потерь различными вариациями градиентного спуска:

1) градиентный спуск, реализованный в классе *GradientOptimizer*;

2) пакетный стохастический градиентный спуск, реализованный в классе *StochasticGradientOptimizer*;

3) минипакетный стохастический градиентный спуск, реализованный в классе *MiniBatchStochasticGradientOptimizer*.

Классы оптимизаторы на основе градиента полученного с помощью метода *backward* класса *Word2VecSkipGram* производят необходимые вычисления для минимизации функции потерь нейросети. В дальнейшем оптимизаторы могут быть расширены, путем добавления новых классов, унаследованных от абстрактного класса *OptimizerAbstract*.

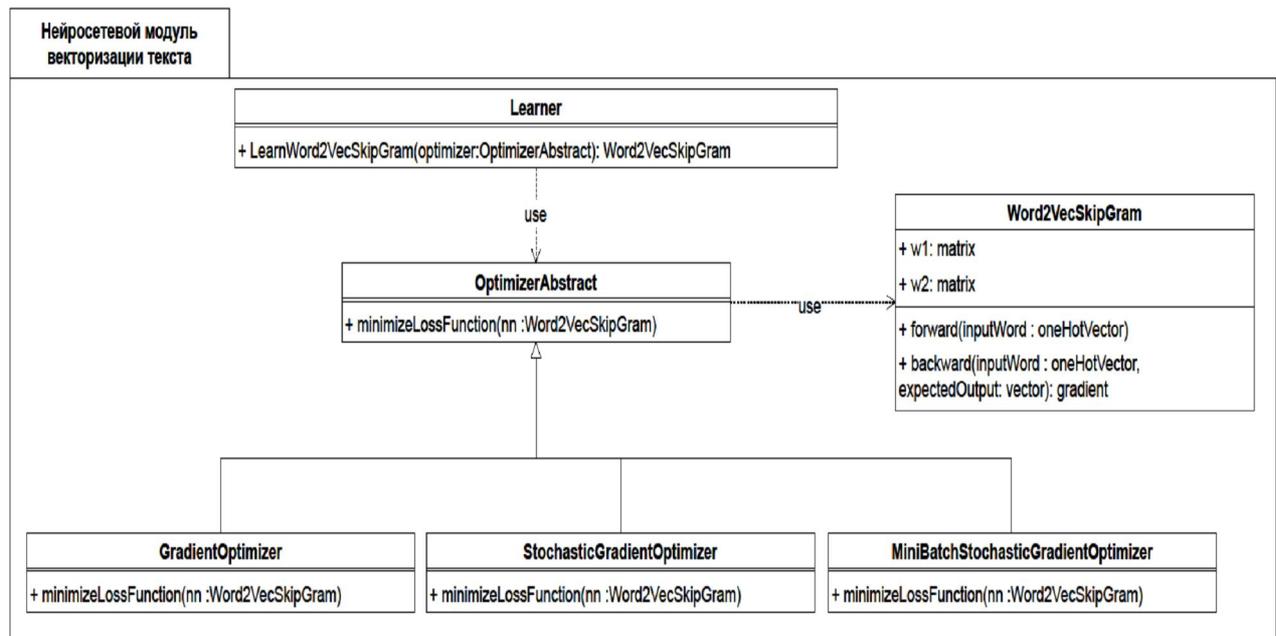


Рис. 3. Диаграмма классов нейросетевого модуля векторизации текста

Fig. 3. Class diagram of the neural network text vectorization module

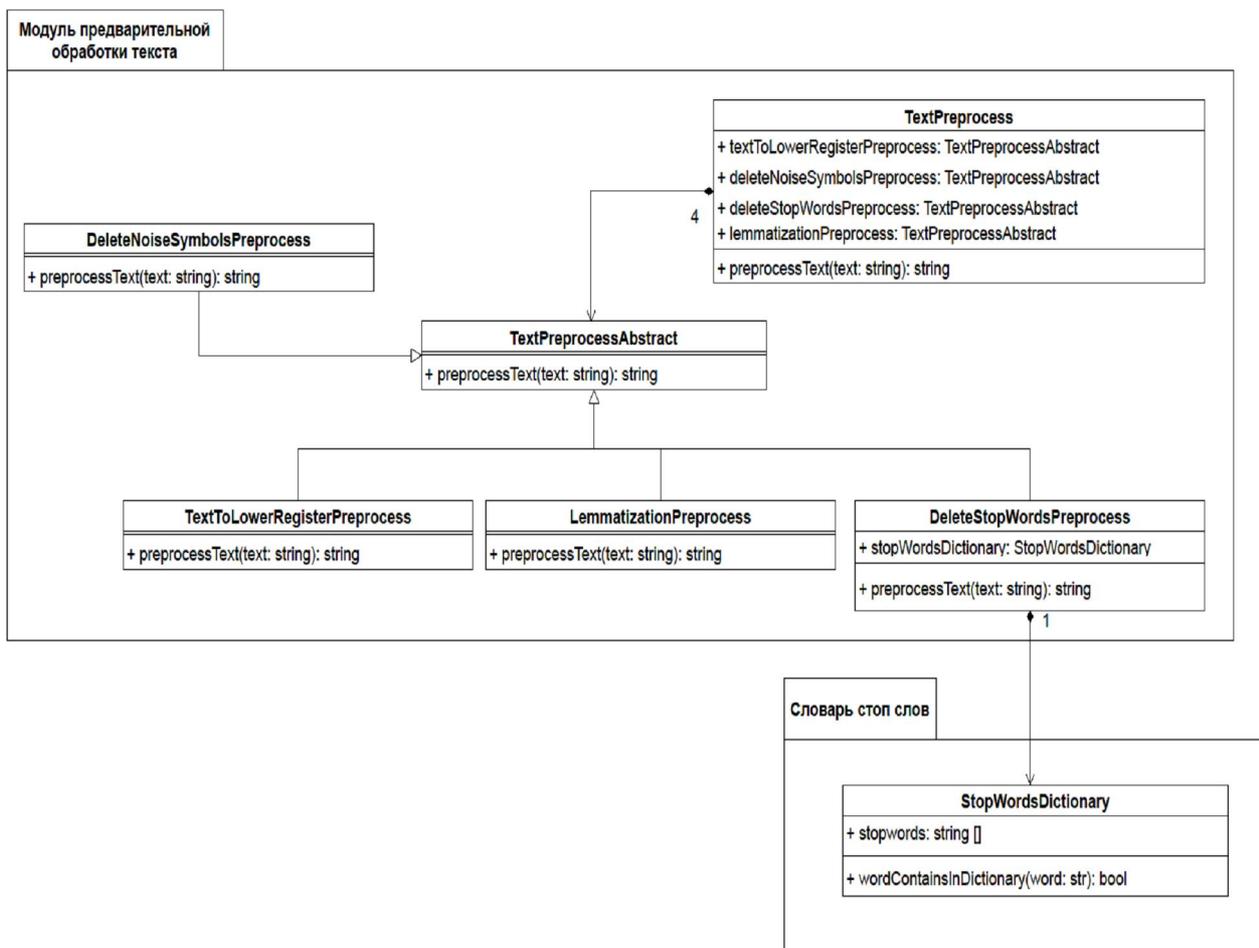


Рис. 4. Диаграмма классов модуля предварительной обработки текста

Fig. 4. Class diagrams of the text preprocessing module

Каждый этап конвейера предварительной обработки текста был реализован отдельными классами, унаследованными от абстрактного класса *TextPreprocessAbstract*, который связан с классом *TextPreprocess* отношением композиции:

- 1) класс *LemmatizationPreprocess* выполняет лемматизацию слов;
- 2) класс *TextToLowerRegisterPreprocess* преобразует текстовую информацию в нижний регистр для того чтобы одно и то же слово, представленное в верхнем и нижнем регистре, не идентифицировалось системой как разные слова;

3) класс *DeleteNoiseSymbolsPreprocess* реализует логику удаление шумовых символов;

4) класс *DeleteStopWordsPreprocess*. содержит в себе объект класса *StopWordsDictionary*, который, в свою очередь, содержит в себе информацию о стоп словах. Класс *StopWordsDictionary* также может выступать в роли промежуточно звена для использования существующих библиотек с функционалом определения стоп слов;

5) класс *SemanticSimiliary* преобразует каждое слово входных текстов в соответствующее векторное представ-

ление. Затем на основе сумм векторных представлений слов первого и второго текста производится расчёт косинусной схожести по формуле (1).

Модель *Word2Vec* с архитектурой *Skip-gram* была обучена на двух текстовых корпусах с информацией о компьютерной науке и зоологии. Размерность векторного пространства для слов была равна 200.

### Результаты и их обсуждение

Примеры определения семантической близости двух текстов представлены на рис. 6, 7 и 8.

По результатам на рис. 6 и рис. 7 видно, что два текста с общей тематикой, имеют значение косинусного сходства больше 0. Тем самым можно судить о их семантической близости. По рис. 8 видно, если два текста имеют разную тематику, то их косинусное сходство имеет отрицательное значение, которое можно интерпретировать как отсутствие семантической близости.

Пример расчета семантической близости на основе текстовой информации о рабочей программе учебной дисциплины и аннотации научной статьи условного преподавателя представлены на рис. 9.

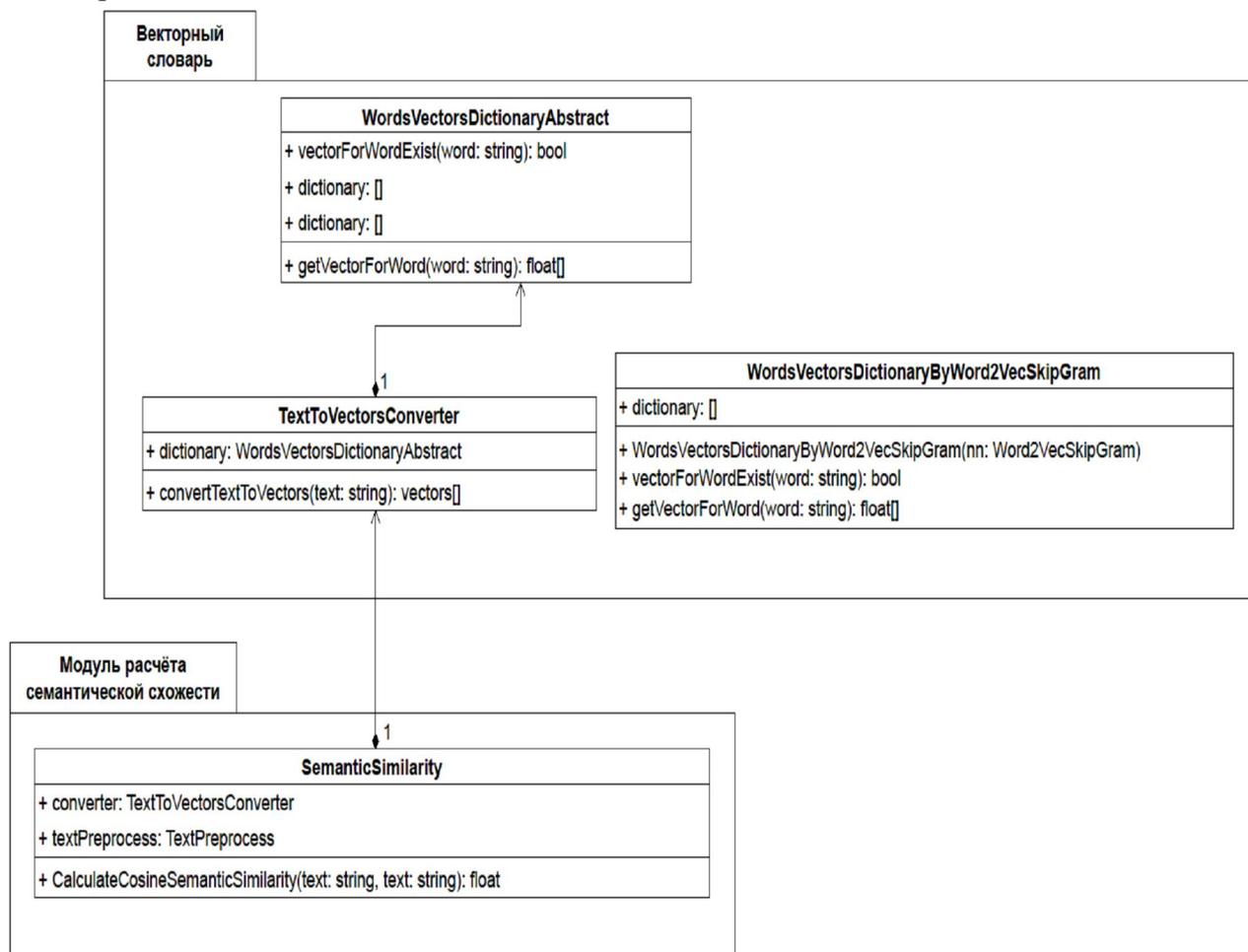
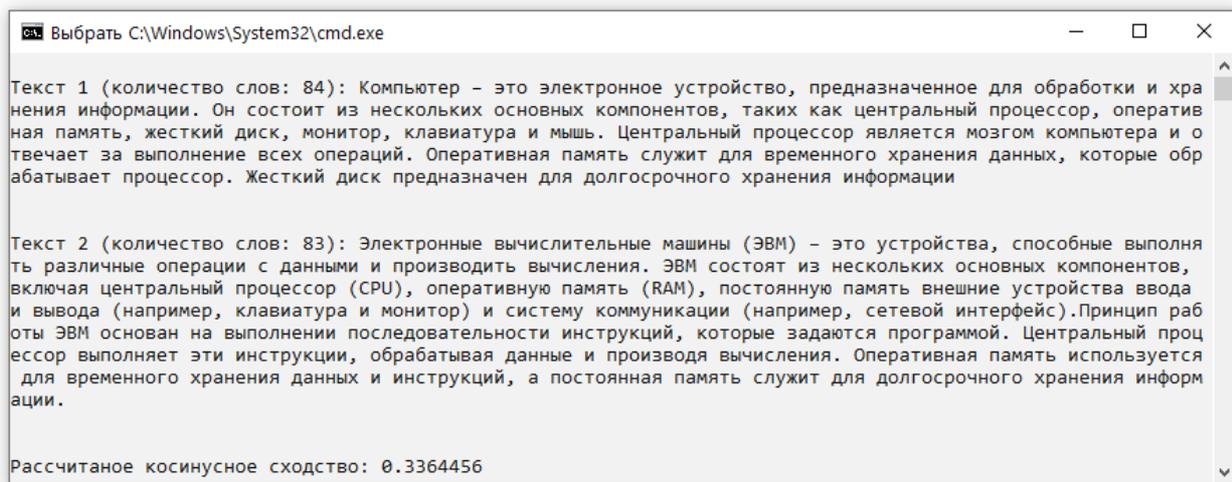


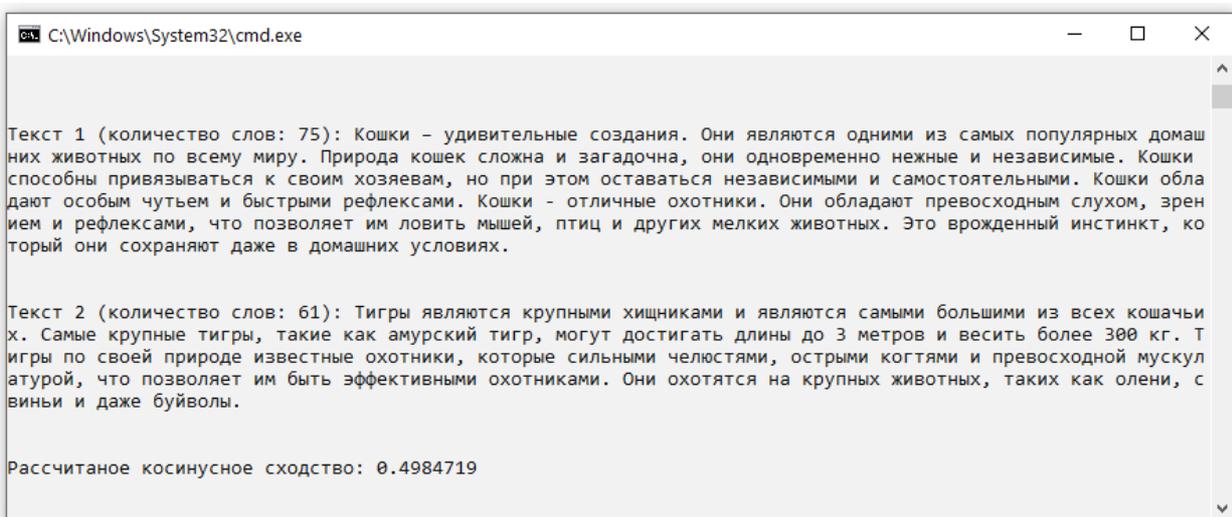
Рис. 5. Диаграмма классов модулей векторного словаря и модуля расчета семантической схожести

Fig. 5. Class diagrams of vector dictionary modules and semantic similarity calculation module



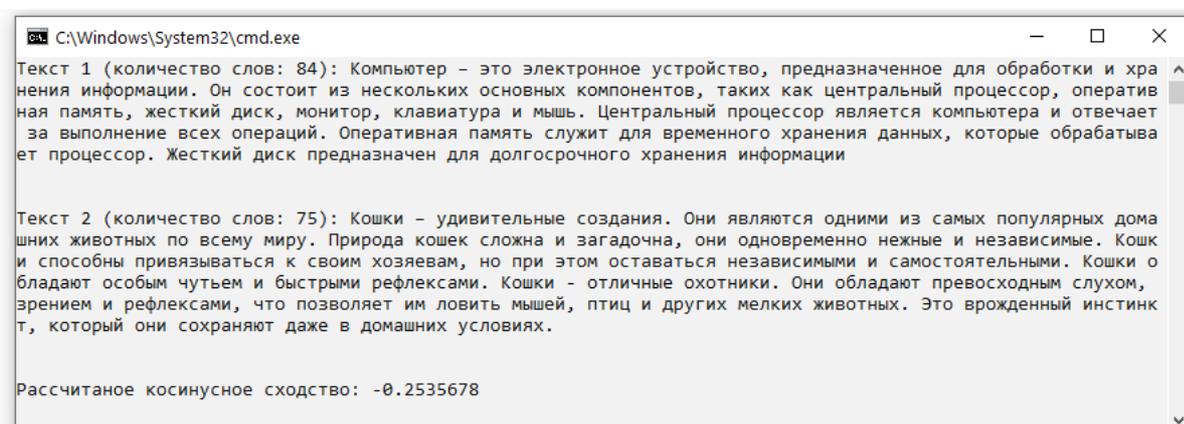
**Рис. 6.** Косинусное сходство для текстов компьютерной тематики

**Fig. 6.** Cosine similarity for computer texts



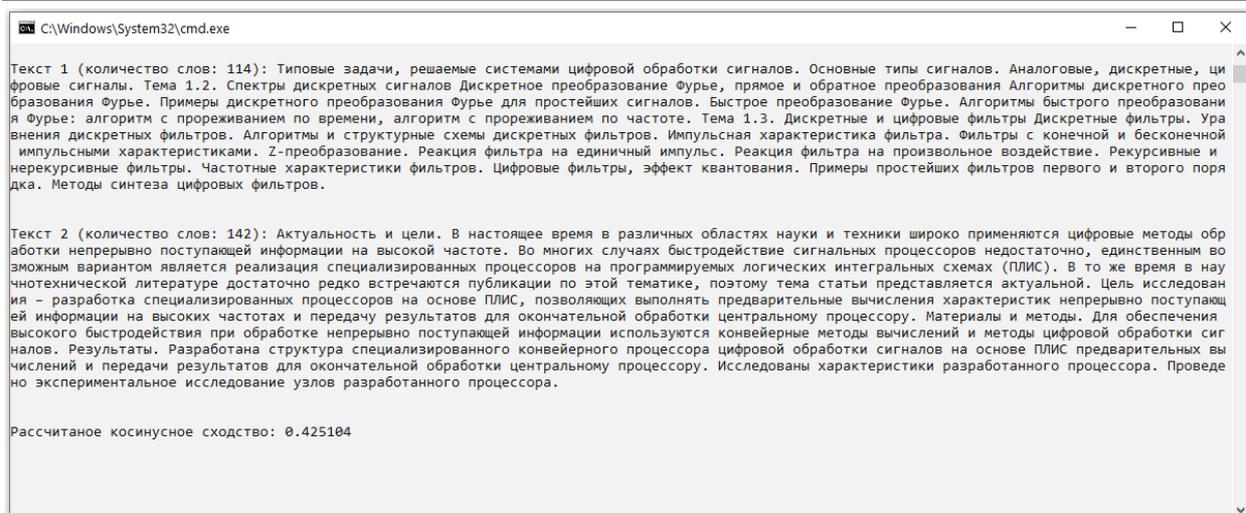
**Рис. 7.** Косинусное сходство для текстов зоологической тематики

**Fig. 7.** Cosine similarity for texts on zoological topics



**Рис. 8.** Косинусное сходство для текстов различной тематики

**Fig. 8.** Cosine similarity for texts of various subjects



**Рис. 9.** Косинусное сходство для рабочей программы учебной дисциплины и аннотации научной статьи

**Fig. 9.** Cosine similarity for the curriculum work program disciplines and abstracts of scientific articles

Результаты косинусного сходства в процессе планирования учебной нагрузки преподавателей могут интерпретироваться следующим образом:

- значение косинусного сходства меньше 0: научные интересы преподавателя и рабочая программа учебной дисциплины не пересекаются, следовательно, преподаватель не может быть назначен к проведению учебных занятий по дисциплине;

- значение косинусного сходства находится в диапазоне от 0 до 0.3: научные интересы преподавателя и рабочая программа учебной дисциплины обладают довольно малой степенью сходства, преподаватель не рекомендуется к проведению учебных занятий по дисциплине;

- значение косинусного сходства находится в диапазоне от 0.4 до 0.6: научные интересы преподавателя имеют сходство, преподаватель может быть

назначен к проведению учебных занятий по дисциплине;

- значение косинусного сходства находится в диапазоне от 0.7 до 1: научные интересы преподавателя обладают значительной степенью сходства, преподаватель рекомендуется к проведению учебных занятий по дисциплине.

Результаты внутреннего тестирования первоначального этапа внедрения предлагаемой в данной статье системы показывают, что определение семантической близости позволит повысить скорость и результативность работ в процессе учебного планирования.

## Выводы

Предложен и реализован программно-агентный модуль системы для определения семантической близости текстовой информации с использованием технологий машинного обучения, продемонстрирована работоспособность подобной системы.

Данная система может быть задействована для выполнения задач по анализу текстовой информации и обработки естественного языка в различных областях. Продemonстрировано, что организация диалогов в человеко-машинной системе требует проведения анализа когнитивных презумпций как человека, так и взаимодействующего с ним агента. Для обозначения семантики реплик и другой информации предложено использовать тегирование и определение семантической близости фрагментов текста.

Результаты настоящей работы предназначены для реализации в ограниченном сегменте Интернета или в корпоративной сети. В этой связи отметим, что в течение последних десяти лет активно развивается концепция когнитивного Интернета вещей [41]. «Обычный» Интернет вещей (англ. IoT – Internet of Things) определяется как гибкая и футуристическая сеть, в которой различные типы устройств и интеллектуальных объектов могут соединяться друг с другом и активно участвовать во всех типах процессов. Новая

парадигма, получившая название «когнитивный Интернет вещей» (англ. CIoT – Cognitive Internet of Things), на первый взгляд еще более футуристична [42]: общие объекты должны иметь возможность самостоятельно «учиться», «думать» и «понимать» как физический, так и социальный мир; предпосылки к этому уже имеются – когнитивный Интернет имеет возможность соединить физический мир (с объектами, ресурсами и т. д.) и социальный мир (с человеческим спросом, социальным поведением и т. д.) и улучшить разумное распределение ресурсов. В перспективе должна быть организована автоматическая работа сети и интеллектуальное предоставление услуг. Поэтому в плане продолжения настоящей работы актуально распространение когнитивной агентно-базированной технологии на распределенную компьютерную систему (например, на пиринговую компьютерную сеть), интегрированную с реализованными программно искусственными нейросетями и базами знаний.

### Список литературы

1. Холодная М.А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. СПб.: Питер, 2004. 384 с.
2. Лобанов А.П. Психология интеллекта и когнитивных стилей. Минск: Агентство В. Гревцова, 2008. 296 с.
3. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. Cambridge University Press, 2008. 532 p.
4. Wooldridge M. J. An Introduction to Multiagent Systems. John Willey&Sons, 2009. 484 p.

5. Лисанюк Е. Н. Когнитивные характеристики агентов аргументации // Вестник СПбГУ. Сер. 6. Вып. 1. 2013. С. 13–21.
6. Павлова А. М. Истинность в диалоговой логике и теоретико-игровой семантике (GTS) // Логические исследования. 2015. Т. 21, № 2. С. 107–133.
7. Лисанюк Е. Н., Павлова А. М. Логические аспекты многообразия агентов // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2016. Т. 11. № 4. С. 45-60.
8. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic I: Modeling Knowledge and Belief // Philosophy Compass. 2013. Vol. 8, № 9. P. 798–814.
9. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic II: Logics of Information Change // Philosophy Compass. 2013. Vol. 8, № 9. P. 815–833.
10. Модель убеждений, желаний и намерений. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Модель\\_убеждений,\\_желаний\\_и\\_намерений](https://ru.wikipedia.org/wiki/Модель_убеждений,_желаний_и_намерений). (дата обращения: 12.12.2023).
11. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
12. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. №2. С. 5-63.
13. Швецов А. Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям. EDU.RU: Всеросс. конкурс. отбор обзор.-аналит. ст. по приоритет. направл.: Информационно-телекоммуникационные системы. 101 с. URL: [http://window.edu.ru/window\\_catalog/files/r56179/62333e1-st20.pdf](http://window.edu.ru/window_catalog/files/r56179/62333e1-st20.pdf). (дата обращения: 12.12.2023).
14. Макаренко С.И., Соловьева О.С. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетевых систем // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №4. 24 с. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.10>.
15. Макаренко С.И. Справочник научных терминов и обозначений. СПб.: Научно-емкие технологии, 2019. 254 с.
16. Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises (SCOPE) Model for Interoperability Assessment. Version 1.0. NCOIC, 2008. 154 p.
17. Титова Т. А. Антропоморфизм как форма познания мира // Ученые записки Казанского государственного университета. Гуманитарные науки, 2010. Т. 152, кн. 1. С. 172-179.
18. Маклаков А. Г. Общая психология. СПб.: Питер, 2016. 583 с.
19. Психология / под общ. ред. В. Н. Дружинина. СПб.: Питер, 2009. 656 с.
20. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию / А. Тейз, П. Грибомон, Ж. Луи [и др.]. М.: Мир, 1990. 429 с.
21. Лисанюк Е. Н. Лояльный агент и отменяемость в деонтической логике // Изв. Урал. федер. ун-та. Серия 3: Общественные науки. 2014. Вып. 1(125). С. 32–44.

22. Караваев Э. Ф. Вера и знание: Наследие Канта в философии и логике сегодня // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Серия 17: Философия. Конфликтология. Культурология. Религиоведение. 2014. № 3. С. 5–15.

23. Найденова К. А., Невзорова О. А. Машинное обучение в задачах обработки естественного языка: обзор современного состояния исследований // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2008. Т. 150. №. 4. С. 5-24. URL: <http://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/27150>.

24. Shahmirzadi O., Lugowski A., Younge K. Text similarity in vector space models: a comparative study // 2019 18th IEEE international conference on machine learning and applications (ICMLA). IEEE, 2019. P. 659-666. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2019.00120>.

25. Кравченко Ю. А., Мансур А. М., Хуссайн М. Ж. Векторизация текста с использованием методов интеллектуального анализа данных // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2021. №. 2 (219). С. 154-167.

26. Siolas G., d'Alché-Buc F. Support vector machines based on a semantic kernel for text categorization // Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium. IEEE, 2000. Vol. 5. P. 205-209. <http://doi.org/10.1109/IJCNN.2000.861458>.

27. Singh A. K., Shashi M. Vectorization of text documents for identifying unifiable news articles // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2019. Vol. 10. No. 7. P. 305-310. <http://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100742>.

28. Thavareesan S., Mahesan S. Sentiment lexicon expansion using Word2vec and fastText for sentiment prediction in Tamil texts // Moratuwa engineering research conference (MERCCon). IEEE, 2020. P. 272-276. <https://doi.org/10.1109/MERCCon50084.2020.9185369>.

29. Дроняева В. В., Хроль Е. В. Способы взаимодействия и обмена данными с помощью программного интерфейса веб-приложений // Актуальные вопросы современной науки и образования. Пенза, 2023. С. 42-44.

30. Rahimi Z., Nomayounpour M. M. The impact of preprocessing on word embedding quality: A comparative study // Language Resources and Evaluation. 2023. Vol. 57. No. 1. P. 257-291. <http://doi.org/10.1007/s10579-022-09620-5>.

31. Мельчук И.А. Опыт теории лингвистических моделей «Смысл-Текст». М.: Языки русской культуры, 1999. 346 с.

32. Чельшев Э. А., Оцоков Ш. А., Раскатова М. В. Автоматическая рубрикация текстов с использованием алгоритмов машинного обучения // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2021. № 4. С. 185-193. <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.21.04.P.175>

33. Построение частотных словарей на основе исходных текстов с применением лемматизации / И.В. Ковалев, А.И. Середин, М.В. Карасева, П.В. Зеленков, В.В. Хра-

пунова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. №4. С. 39-41.

34. Милованов А. С., Карамышева Н. С., Митрохин М. А. Автоматизированная система планирования учебных занятий преподавателей вуза // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2022). Пенза, 2022. С. 438-444.

35. Numpy. URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 02.12.2023).

36. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space / T. Mikolov, G. Corrado, K. Chen, J. Dean // Proceedings of the International Conference on Learning Representations ICLR, 2013. P. 1–12. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.3781>.

37. Hecht-Nielsen R. Theory of the backpropagation neural network. Neural networks for perception. Academic Press, 1992. P. 65-93. <https://doi.org/10.1016/0893-6080%2888%2990469-8>.

38. Large-margin softmax loss for convolutional neural networks / Weiyang Liu, Yandong Wen, Zhiding Yu, Meng Yang. 2016. Pp. 1-10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.02295>.

39. De Boer P. T. et al. A tutorial on the cross-entropy method // Annals of operations research. 2005. Vol. 134. P. 19-67. <https://doi.org/10.1007/S10479-005-5724-Z>.

40. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms. 2016. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.04747>.

41. Raj P., Raman A.C., Subramanian H. Cognitive Internet of Things. Enabling Technologies, Platforms, and Use Cases. CRC Press. Auerbach Publications. Pub. Location New York, 2022. 326 p. <https://doi.org/10.1201/9780429328220>.

42. Cognitive Internet of Things: A New Paradigm beyond Connection / Qihui Wu, Guoru Ding, Yuhua Xu, Shuo Feng, Zhiyong Du, Jinlong Wang, Keping Long. IEEE Internet of Things Journal. March 2014. 1(2). P. 129-143. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6766209>. DOI:10.1109/JIOT.2014.2311513.

## References

1. Kholodnaya M.A. *Kognitivnye stili. O prirode individual'nogo uma* [Cognitive styles. On the nature of the individual mind]. St. Petersburg, Peter Publ., 2004. 384 p.

2. Lobanov A.P. *Psihologiya intellekta i kognitivnyh stilej* [Psychology of intelligence and cognitive styles]. Minsk, 2008. 296 p.

3. Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press, 2008, 532 p.

4. Wooldridge M. J. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Willey&Sons, 2009. 484 p.

5. Lisanyuk E. N. Kognitivnye karakteristiki agentov argumentacii [Cognitive characteristics of agents of argumentation]. *Vestnik. SPbGU. Ser. 6. Vyp. 1. = Bulletin St. Petersburg State University. Series 6*, 2013, is. 1, pp. 13–21.

6. Pavlova A. M. Istinnost' v dialogovoj logike i teoretiko-igrovoj semantike [Truth in dialogue logic and game-theoretic semantics (GTS)]. *Logicheskie issledovaniya = Logical Research*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 107–133.

7. Lisanyuk E. N., Pavlova A. M. Logicheskie aspekty mnogoobraziya agentov [Logical aspects of the diversity of agents]. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of UrFU. Series: Economics and management*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 45-60.

8. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic I: Modeling Knowledge and Belief. *Philosophy Compass*, 2013, vol. 8, no. 9, pp. 798–814.

9. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic II: Logics of Information Change. *Philosophy Compass*, 2013, vol. 8, no. 9, pp. 815–833.

10. *Model' ubezhdenij, zhelanij i namerenij* [Model of beliefs, desires and intentions] Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Model\\_of\\_beliefs,\\_desires\\_and\\_intentions](https://ru.wikipedia.org/wiki/Model_of_beliefs,_desires_and_intentions) (accessed 12.12.2023).

11. Tarasov V. B. *Ot mnogoagentnyh sistem k intellektual'nym organizacijam: filozofiya, psihologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 352 p.

12. Tarasov V. B. Agenty, mnogoagentnye sistemy, virtual'nye soobshchestva: strategicheskoe napravlenie v informatike i iskusstvennom intellekte [Agents, multi-agent systems, virtual communities: strategic direction in computer science and artificial intelligence]. *Novosti iskusstvennogo intellekta = Artificial Intelligence News*, 1998, no. 2, pp. 5-63.

13. Shvetsov A. N. *Agentno-orientirovannye sistemy: ot formal'nyh modelej k promyshlennym prilozheniyam. EDU.RU: Vseross. konkurs. otbor obzor.-analit. st. po prioritet. napravl.: Infor-macionno-telekommunikacionnye sistemy* [Agent-based systems: from formal models to industrial applications. EDU.RU: All-Russian. contest. selection review.-analyst. Art. by priority direction: Information and telecommunication systems]. 101 p. Available at: [http://window.edu.ru/window\\_catalog/files/r56179/62333e1-st20.pdf](http://window.edu.ru/window_catalog/files/r56179/62333e1-st20.pdf) (accessed: 12.12.2023).

14. Makarenko S.I., Solovyova O.S. Osnovnye polozheniya koncepcii semanticheskoy interoperabel'nosti setecentricheskikh sistem. [Basic provisions of the concept of semantic interoperability of network-centric systems]. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*, 2021, no. 4, 24 p. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.10>.

15. Makarenko S.I. *Spravochnik nauchnyh terminov i oboznachenij* [Directory of scientific terms and notations]. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2019, 254 p.

16. Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises (SCOPE) Model for Interoperability Assessment. Version 1.0. NCOIC, 2008. 154 p.

17. Titova T. A. Antropomorfizm kak forma poznaniya mira [Anthropomorphism as a form of knowledge of the world]. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Gumanitarnye nauki. = Scientific notes of the Kazan State University. Humanitarian sciences*. 2010, vol. 152, book 1, pp. 172-179.

18. Maklakov A. G. *Obshchaya psihologiya* [General psychology]. St. Petersburg, Peter Publ., 2016, 583 p.
19. *Psychology* [Psychology]; ed. by V. N. Druzhinin. St. Petersburg, Peter Publ., 2009. 656 p.
20. Teiz A., Gribomon P., Louis J. et al. *Logicheskij podhod k iskusstvennomu intellektu: ot klassicheskoy logiki k logicheskomu programmirovaniyu* [Logical approach to artificial intelligence: from classical logic to logic programming]. Moscow, Mir Publ., 1990. 429 p.
21. Lisanyuk E. N. Loyal'nyj agent i otmenyaemost' v deonticheskoy logike [Loyal agent and cancelability in deontic logic]. *Izv. Ural. feder. un-ta. Seriya 3: Obshchestvennyye nauki. = Izv. Ural. federal un-ty. Series 3: Social Sciences*, 2014, vol. 1(125), pp. 32–44.
22. Karavaev E.F. Vera i znanie: Nasledie Kanta v filosofii i logike segodnya [Faith and knowledge: Kant's legacy in philosophy and logic today]. *Vestn. Sankt-Peterburg. un-ta. Seriya 17: Filosofiya. Konfliktologiya. Kul'turologiya. Religiovedenie = Bulletin Saint Petersburg. un-ty. Series 17: Philosophy. Conflictology. Culturology. Religious Studies*, 2014, no. 3, pp. 5–15.
23. Naydenova K. A., Nevzorova O. A. Mashinnoe obuchenie v zadachah obrabotki estestvennogo yazyka: obzor sovremennogo sostoyaniya issledovanij. [Machine learning in natural language processing problems: a review of the current state of research]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki = Scientific notes of Kazan University. Series: Physics and Mathematics*, 2008, vol. 150, no. 4, pp. 5-24. Available at: <http://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/27150>.
24. Shahmirzadi O., Lugowski A., Younge K. Text similarity in vector space models: a comparative study. *18th IEEE international conference on machine learning and applications (ICMLA)*. IEEE, 2019, pp. 659-666. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2019.00120>.
25. Kravchenko Yu. A., Mansur A. M., Hussain M. Zh. Vektorizaciya teksta s ispol'zovaniem metodov intellektual'nogo analiza dannyh [Text vectorization using data mining methods]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Southern Federal University. Technical science*. 2021, no. 2 (219), pp. 154-167.
26. Siolas G., d'Alché-Buc F. Support vector machines based on a semantic kernel for text categorization. *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium*. IEEE, 2000, vol. 5, pp. 205-209. <http://doi.org/10.1109/IJCNN.2000.861458>.
27. Singh A. K., Shashi M. Vectorization of text documents for identifying unifiable news articles. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, vol. 10, no. 7, pp. 305-310. <http://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100742>.
28. Thavareesan S., Mahesan S. Sentiment lexicon expansion using Word2vec and fastText for sentiment prediction in Tamil texts. *Moratuwa engineering research conference (MERCon)*. IEEE, 2020, pp. 272-276. <https://doi.org/10.1109/MERCon50084.2020.9185369>.

29. Dronyaeva V. V., Khrol E. V. [Methods of interaction and data exchange using a software interface for web applications]. *Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki i obrazovaniya* [Current issues of modern science and education]. Penza, 2023, pp. 42-44 (In Russ.).
30. Rahimi Z., Homayounpour M. M. The impact of preprocessing on word embedding quality: A comparative study. *Language Resources and Evaluation*, 2023, vol. 57, no. 1, pp. 257-291. <http://doi.org.10.1007/s10579-022-09620-5>.
31. Melchuk, I.A. *Opyt teorii lingvisticheskikh modelej «Smysl-Tekst»* [Experience in the theory of linguistic models “Meaning-Text”]. Moscow, Yazyki russkoj kul'tury Publ., 1999, 346 p.
32. Chelyshev E. A., Otsokov Sh. A., Raskatova M. V. Avtomaticheskaya rubrikaciya tekstov s ispol'zovaniem algoritmov mashinnogo obucheniya. [Automatic rubrication of texts using machine learning algorithms]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta seriya «Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie» = Bulletin of the Russian New University. Series: “Complex systems: models, analysis, management”*, 2021, no. 4, pp. 185-193. <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.21.04.P.175>.
33. Kovalev I.V., Seredin A.I., Karaseva M.V., Zelenkov P.V., Khrapunova V.V. Postroenie chastotnyh slovarej na osnove iskhodnyh tekstov s primeneniem lemmatizacii [Construction of frequency dictionaries based on source texts using lemmatization]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*, 2013, no. 4, pp. 39-41.
34. Milovanov A.S., Karamysheva N.S., Mitrokhin M.A. [Automated system for planning training sessions for university teachers]. *Novye informacionnye tekhnologii i sistemy (NITIS-2022)* [New information technologies and systems (NITIS-2022)]. Penza, 2022, pp. 438-444 (In Russ.).
35. Numpy. Available at: <https://numpy.org/> (accessed: 12.12.2023).
36. Mikolov T., Corrado G., Chen K., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations ICLR*, 2013, pp. 1–12. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.3781>.
37. Hecht-Nielsen R. *Theory of the backpropagation neural network. Neural networks for perception*. Academic Press, 1992, pp. 65-93. <https://doi.org/10.1016/0893-6080%2888%2990469-8>.
38. Weiyang Liu, Yandong Wen, Zhiding Yu, Meng Yang. *Large-margin softmax loss for convolutional neural networks*. 2016, pp. 1-10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.02295>.
39. De-Boer P.T., Kroese D.P., Mannor S., Rubinstein R.Y. A tutorial on the cross-entropy method. *Annals of operations research*. 2005, vol. 134, pp. 19-67. <https://doi.org/10.1007/S10479-005-5724-Z>.

40. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms, 2016, pp. 1-14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.04747>.

41. Raj P., Raman A.C., Subramanian H. *Cognitive Internet of Things. Enabling Technologies, Platforms, and Use Cases*. CRC Press. Auerbach Publications. Pub. Location New York, 2022, 326 p. <https://doi.org/10.1201/9780429328220>.

42. Qihui Wu, Guoru Ding, Yuhua Xu, Shuo Feng, Zhiyong Du, Jinlong Wang, Keping Long Cognitive Internet of Things: A New Paradigm beyond Connection. *IEEE Internet of Things Journal*, March 2014. 1(2), pp. 129-143. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6766209>. (accessed: 12.12.2023). DOI:10.1109/IJOT.2014.2311513.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Карамышева Надежда Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: [karamyshevans@yandex.ru](mailto:karamyshevans@yandex.ru)

**Nadezhda S. Karamysheva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: [karamyshevans@yandex.ru](mailto:karamyshevans@yandex.ru)

**Милованов Антон Сергеевич**, магистрант, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: [vt@pnzgu.ru](mailto:vt@pnzgu.ru)

**Anton S. Milovanov**, Master Student, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: [vt@pnzgu.ru](mailto:vt@pnzgu.ru)

**Митрохин Максим Александрович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Вычислительная техника», Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: [vt@pnzgu.ru](mailto:vt@pnzgu.ru)

**Maksim A. Mitrokhin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, head of the Sub-Department of Computer Engineering, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: [vt@pnzgu.ru](mailto:vt@pnzgu.ru)

**Зинкин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: [zsa49@yandex.ru](mailto:zsa49@yandex.ru)

**Sergey A. Zinkin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: [zsa49@yandex.ru](mailto:zsa49@yandex.ru)

## Методика формирования требований к характеристикам информационного обеспечения систем управления беспилотных авиационных транспортных систем

М.В. Мамченко <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова  
Российской академии наук  
ул. Профсоюзная, д. 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: markmamcha@gmail.com

### Резюме

**Цель исследования** заключается в разработке и описании методики формирования требований к характеристикам информационного обеспечения функционирования системы управления (СУ) беспилотной авиационной транспортной системы (БАТС) для обеспечения безопасности полетов.

**Методы.** Предлагаемая методика формирования требований к характеристикам информационного обеспечения функционирования СУ БАТС основана на методах системного анализа, когнитивном подходе и методах многокритериального анализа решений.

**Результаты.** Рассмотрены и описаны основные задачи, решаемые на этапе определения концепции, в том числе оценка требований к показателям функционирования, описание функциональной архитектуры и физической реализации, а также их валидация. В рамках архитектурного проектирования и анализа определен набор подсистем, присутствие которых в СУ БАТС требуется для реализации функций и соответствия функциональным требованиям, а также соответствующий набор модулей каждой подсистемы. Проанализированы преимущества и недостатки различных вариантов функциональной архитектуры подсистем СУ БАТС. На основе результатов формирования концепции и архитектурного проектирования и анализа обобщены и представлены основные и вспомогательные характеристики информационного обеспечения СУ БАТС. Показано, что для решения задачи оценки влияния характеристик информационного обеспечения на показатели функционирования технологий интеллектуальной автоматизации управления БАТС следует применять когнитивный подход и методы многокритериального анализа решений. Применение предложенной методики формирования характеристик информационного обеспечения СУ БАТС показано на примере реальной транспортной задачи.

**Заключение.** Предложенная методика позволяет формировать требования к информационному обеспечению СУ БАТС и его характеристикам, исходя из целевого назначения системы и ее функциональной архитектуры (в том числе к составу и структуре информационных потоков, формату представления и передачи данных, частоты предоставления информации и т.д.) для обеспечения требуемой адекватности, полноты и своевременности предоставления информации, требуемой для принятия решений.

**Ключевые слова:** информационное обеспечение; беспилотная транспортная система; система управления; беспилотный летательный аппарат; интеллектуальное управление; автоматизированная система.

**Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках выполнения научно-исследовательской работы на тему «Разработка методического и нормативного обеспечения создания и внедрения перспективных технологий интеллектуальной автоматизации управления функционированием беспилотных авиатранспортных систем в обеспечение приемлемого уровня безопасности полетов», рег. № НИОКТР 123103100009-8.

**Благодарности:** Автор выражает благодарность и признательность главному научному сотруднику Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН д.т.н. Захаровой Алёне Александровне, профессору кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета к.т.н. Подвесовскому Александру Георгиевичу и старшему научному сотруднику Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН к.т.н. Исаковой Анастасии Олеговне за значительный вклад в подготовку и написание настоящей статьи.

**Для цитирования:** Мамченко М.В. Методика формирования требований к характеристикам информационного обеспечения систем управления беспилотных авиационных транспортных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 123-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-123-147>.

Поступила в редакцию 25.01.2024

Подписана в печать 10.02.2024

Опубликована 27.03.2024

## Method of Forming the Requirements to Information Support Characteristics of Control Systems of Unmanned Aircraft Transport Systems

Mark V. Mamchenko <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences  
65, Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: markmamcha@gmail.com

### Abstract

**Purpose or research.** The aim of the study is to develop and describe a method of forming the requirements to information support characteristics of control systems (CS) of unmanned aircraft transport systems (UATS) to ensure the safety of flights.

**Methods.** The proposed method of forming the requirements to information support characteristics of UATS CS is based on the methods of system analysis, cognitive approach, and methods of multi-criteria decision analysis.

**Results.** The paper considers and describes main tasks solved at the stage of concept definition, including analysis of the requirements to performance indicators, functional description, physical implementation description, and design solutions validation. Within the architectural design and analysis, a set of subsystems (the presence of which in UATS CS is required for the implementation of functions and compliance with functional requirements), and the corresponding set of modules of each subsystem have been defined. The advantages and disadvantages of various functional architectures of UATS CS subsystems have been analyzed. Based on the results of the concept formation, and architectural design and analysis, the basic and auxiliary characteristics of UATS CS information support have been generalized and presented. It is shown that in order to solve the problem of assessment of the influence of information support characteristics on the indicators of the functioning of UATS CS intellectual automation technologies it is necessary to use cognitive approach and methods of multi-criteria decision analysis. The application of the proposed method of forming of UATS CS information support characteristics is shown on the example of a real transportation problem.

**Conclusion.** The proposed method allows forming the requirements to UATS CS information support and its characteristics, based on the purpose of the system and its functional architecture (including the composition and

structure of information flows, output and transmission format, frequency of information delivery, etc.) to ensure the required adequacy, completeness and timeliness of information required for decision-making.

**Keywords:** information support; unmanned aerial transport system; control system; unmanned aerial vehicle; intelligent control; automated system.

**Conflict of interest.** The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The reported study has been carried out as part of the research work «Development of methodical and regulatory support of creation and introduction of advanced technologies of intellectual automation of operation control of unmanned aerial transport systems in the provision of acceptable level of flight safety», R&D reg. No. 123103100009-8.

**Acknowledgement:** The author expresses gratitude and appreciation to Chief Researcher of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences Alena A. Zakharova; Professor, Head of Informatics and Software Engineering Department of Bryansk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences Aleksandr G. Podvesovskii; and Senior Researcher of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Candidate of Engineering Sciences Anastasia O. Iskhakova for significant contribution to the preparation and writing of this paper.

**For citation:** Mamchenko M. V. Method of Forming the Requirements to Information Support Characteristics of Control Systems of Unmanned Aircraft Transport Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 123-147 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-123-147>.

Received 25.01.2024

Accepted 10.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

## Введение

Понятие интеллектуальной автоматизации управления опирается на хорошо известные из теории управления концепции автоматизированного управления и интеллектуального управления [1, 2]. В общем случае автоматизированное управление представляет собой такой вид управления, когда управляемая система является техническим, кибернетическим или киберфизическим объектом, а управляющая система включает комплекс подсистем планирования и управления, а также человека, который принимает наиболее важные и ответственные решения. С развитием методов и технологий искусственного интеллекта наметилась тенденция к ин-

теллектуализации систем управления, которая, как отмечается в [1], призвана решить ряд имеющихся проблем, в том числе нелинейность объекта управления, недостаток или отсутствие информации для построения моделей объекта управления и/или внешней среды, преобладание в управлении слабоформализованного опыта человека-оператора и т.д. Одной из ключевых особенностей интеллектуального управления является использование результатов анализа данных о функционировании управляемой системы, при этом источники таких данных, как правило, являются разнородными и распределенными, а сами данные чаще всего являются слабо-структурированными и непригодными для обработки традиционными методами.

Соответственно, интеллектуальная автоматизация управления представляет собой технологию, в рамках которой:

– в качестве источника входной информации выступает базовая автоматизация управляемого объекта;

– на основе указанной информации и с использованием технологий (в том числе искусственного интеллекта) строится модель процесса, протекающего в управляемом объекте;

– анализируется текущее состояние процесса в модели и на основе этого формируется комплекс управляющих воздействий [3].

Одним из ключевых требований эксплуатации беспилотных авиационных транспортных систем (БАТС) является обеспечение безопасности их функционирования, в первую очередь, безопасности полетов беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в ее составе. В свою очередь, одной из важнейших задач в данном контексте является формирование требований к информационному обеспечению СУ БАТС (например, к составу и структуре информационных потоков, форматов представления и передачи данных, частоты предоставления информации и т.д.) для обеспечения адекватности, полноты и своевременного предоставления данных, требуемых для принятия решений. В соответствии с ГОСТ Р 59853-2021 «Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения» под

информационным обеспечением автоматизированной системы подразумевается «упорядоченная по структуре и формам представления и предназначенная для использования в автоматизированной системе информация, а также совокупность методов и средств ее формирования, хранения, актуализации и предоставления для использования в автоматизированной системе»<sup>1</sup>.

С учетом изложенного, задача формирования требований к характеристикам информационного обеспечения для обеспечения безопасности объекта управления полагается актуальной. Целью настоящей работы является разработка и описание методики формирования требований к характеристикам информационного обеспечения функционирования системы управления (СУ) БАТС для обеспечения безопасности полетов БЛА, входящих в состав подобных систем.

## Материалы и методы

Компоненты информационного обеспечения автоматизированного управления функционированием объектов БАТС используют главным образом текущую информацию, касающуюся состояния и режимов функционирования БАТС, а также состояния внешней среды. Дан-

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59853-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [сайт]. Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс»; 2024 [обновлено 10 января 2024; процитировано 29 января 2024]. Доступно: <https://docs.cntd.ru/document/1200181819>.

ная информация может поступать как из бортовых, так и из внешних источников, при этом предусматривается возможность перераспределения между ними

функций, а также возможность частичного замещения непосредственного наблюдения текущей обстановки ее интеллектуальным прогнозированием [4-8].



**Рис. 1.** Этапы методики формирования требований к характеристикам информационного обеспечения (на примере СУ БАТС)

**Fig. 1.** Stages of the method of formation of requirements to the characteristics of information support (on the example of UATS CS)

Методику формирования требований к характеристикам информационного обеспечения (применительно к функционированию СУ БАТС для обеспечения безопасности полетов) возможно представить следующими основными этапами (рис. 1):

– определение концепции;

– архитектурное проектирование и анализ;

– определение характеристик информационного обеспечения;

– оценка влияния характеристик информационного обеспечения на показатели функционирования интеллектуальной автоматизации управления.

Рассмотрим данные этапы подробнее.

### 1.1. Определение концепции.

В качестве входных данных выступают сформированные требования к показателям (индикаторам) функционирования, имеющаяся технологическая база, а также организационная и правовая инфраструктура, доступная для целей разработки системы. В результате формируется набор функциональных характеристик системы, а также ее концепция (функциональная и физическая архитектуры).

Определение концепции включает в себя:

1. Анализ требований к показателям функционирования. Основной набор требований к настоящему моменту уже сформирован, и в рамках данного вида деятельности может быть выполнено уточнение требований, а также получение их количественных и/или качественных оценок (при наличии возможности).

2. Функциональное описание, в том числе:

– формирование кортежей «функция – компонент системы», определение способов и порядка взаимодействий функциональных элементов системы;

– разработка описаний функций (описание функциональной реализации).

3. Описание физической реализации, в том числе:

– формирование альтернативных подходов и наборов компонентов (с учетом требований к показателям функционирования);

– подготовка проектных моделей, уточняющих и расширяющих архитектуру системы.

4. Валидация (необязательный подэтап), проводимая для оценки соответствия выбранной концепции набору требований, а также уточнение концепции (при необходимости) [9-18].

1.2. Архитектурное проектирование и анализ.

В соответствии с ГОСТ Р 57100-2016<sup>1</sup>, архитектура системы – принципиальная организация системы, воплощенная в ее элементах, их взаимоотношениях друг с другом и со средой, а также принципы, направляющие ее проектирование и эволюцию. Понятие архитектуры в значительной мере субъективно и имеет множество противоречивых толкований; в лучшем случае оно отображает общую точку зрения команды разработчиков на результаты проектирования системы [16-21].

Определение подсистем и модулей СУ БАТС, связанных с обеспечением безопасности полетов. Опираясь на имеющиеся показатели обеспечения безопасности полетов и используя результаты анализа и моделирования проектных решений, направленных на реализацию требований к характеристикам и показателям функционирования техно-

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57100-2016. Системная и программная инженерия. Описание архитектуры [сайт]. Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс»; 2024 [обновлено 10 января 2024; процитировано 29 января 2024]. Доступно: <https://docs.cntd.ru/document/1200139542>.

логий интеллектуальной автоматизации управления БАТС, следует определить [11, 16, 17-24]:

- необходимый набор подсистем, присутствие которых в СУ БАТС требуется для реализации выделенных обобщенных функций;

- набор модулей, входящих в состав каждой подсистемы, где отдельный модуль отвечает за реализацию одного или нескольких вариантов реализации обобщенных функций.

Функциональное моделирование компонентов СУ БАТС. Описывается функциональное поведение компонентов, в том числе с использованием нотаций BPMN 2.0, IDEF (Integrated Definition), DFD (Data Flow Diagrams), ERD (Entity-Relationship Diagrams), Workflow, средств имитационного моделирования, унифицированного языка моделирования UML и/или интегрированных методологий общего назначения, например, ARIS (Architecture of Integrated Information Systems) [21].

Разработка архитектур и проектных моделей подсистем СУ БАТС, связанных с обеспечением безопасности полетов. На данном подэтапе речь идет о физической архитектуре, и целью разработки является получение следующих видов архитектурных описаний:

- взаимосвязь подсистем СУ БАТС, где возможными типами связей могут быть «часть-целое», передача информации, управление и др.;

- связи подсистем СУ БАТС с внешней средой, включая другие систе-

мы, находящиеся в операционном окружении;

- взаимодействия модулей внутри подсистем [17, 21].

Сравнительный анализ функциональных архитектур СУ БАТС и выбор требуемой архитектуры. На данном подэтапе проводится анализ сформированных вариантов реализации функциональной архитектуры (на основе принципа включения или исключения различных компонентов (подсистем и модулей) из состава структуры СУ БАТС и осуществляется выбор субоптимальной реализации архитектуры, наиболее подходящей под требуемые цель и задачи БАТС. На основе выбранной функциональной архитектуры осуществляется формирование основных и вспомогательных характеристик информационного обеспечения СУ БАТС [25-33].

1.3. Определение основных и вспомогательных характеристик информационного обеспечения (учитывая выделенные подсистемы).

Для технологий автоматизированного интеллектуального управления функционированием объектов БАТС используем следующие характеристики информационного обеспечения [29-31]:

- состав и размерность вектора наблюдения, т.е. набор наблюдаемых и измеряемых показателей (состояние управляемых систем и внешних условий);

- частота и точность измерения указанных показателей;

- способы организации передачи и хранения информации (непосредствен-

но измеренной или обработанной), а также характеристики этих способов по таким показателям, как полнота, оперативность и др.

В контексте решения задач обеспечения безопасности полетов, принципы формирования требований к характеристикам информационного обеспечения функционирования СУ БАТС определяются:

- результатами формирования требований назначения к СУ БАТС;
- составом требований к характеристикам и показателям функционирования технологий интеллектуальной автоматизации управления БАТС;
- результатами обоснования количественных значений требований к показателям функционирования технологий интеллектуальной автоматизации управления БАТС на основе компьютерного моделирования.

1.4. Оценка влияния характеристик информационного обеспечения на показатели функционирования интеллектуальной автоматизации управления БАТС.

Задача оценки влияния характеристик информационного обеспечения на показатели функционирования интеллектуальной автоматизации управления БАТС допускает следующее формальное представление [14, 15-18]:

$$\langle G, X, Q, RG, C, F \rangle, \quad (1)$$

где  $G$  – обобщенный показатель функционирования, отражающий некоторую комплексную точку зрения на эффективность функционирования;

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$  – множество альтернатив, в роли которых выступают проектные решения, обеспечивающие выполнение функциональных требований к технологиям интеллектуальной автоматизации управления БАТС в интересах обеспечения безопасности полетов;

$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_p\}$  – набор показателей функционирования (детализирующий понятие эффективности функционирования);

$RG = RG(G, Q)$  – отношение, отражающее структуру взаимосвязи и характер взаимовлияния показателей, составляющих набор  $Q$ , а также их влияния на обобщенный показатель  $G$ , с учетом глобальности или конкретности выражаемых ими свойств, степени важности и т.д.;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  – набор элементарных (базовых) показателей (критериев), по которым выполняется непосредственное оценивание альтернатив (данный набор является подмножеством  $Q$ , т.е.  $C \subset Q$ );

$F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  – способы оценки альтернатив по критериям из набора  $C$ .

В общем случае под механизмом оценивания понимается формализованная процедура получения, обработки и/или преобразования информации с целью получения оценки по соответствующему показателю.

В ходе анализа и формализации задачи (1) выполняются: структуризация набора показателей  $Q$ , в ходе которой могут корректироваться и уточняться

сам набор  $Q$  (в том числе подмножество базовых показателей  $C$ ), а также отношение  $RG$ ; формализация структуры; структуризация пространства критериальных оценок по набору  $C$ , формализация критериальных оценок и выбор алгоритмов оценивания. Формализованное представление рассматриваемого подэтапа зададим следующим образом:

$$\langle R_G \leftarrow \overline{R_G}, F \leftarrow \overline{F} \rangle, \quad (2)$$

где знак « $\leftarrow$ » означает введение формализованной структуры;

$\overline{R_G}, \overline{F}$  – представляют отношение  $RG$  и набор  $F$  соответственно.

При этом

$$\overline{F} = \{\overline{F_1}, \overline{F_2}, \dots, \overline{F_n}\};$$

$$\overline{F_j} = \langle E_j, M_j, f_j \rangle \quad (j = 1, \dots, n), \quad (3)$$

где  $E_j$  – множество возможных оценок по критерию  $C_j$ ;

$M_j$  – представление элементов множества  $E_j$ ;

$f_j$  – отображение альтернатив  $X$  в критериальные оценки  $E_j$ .

Формализованное представление следующего подэтапа – оценивания альтернатив и формирование для них критериальных оценок – имеет вид:

$$\langle X, C, \overline{F}; C(X) \rangle, \quad (4)$$

где  $C(X) = \|C_j(X_i)\|$  ( $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ ) – матрица с формализованными оценками альтернативы  $X_i$  по критерию  $C_j$ .

После получения формализованных критериальных оценок для имеющихся альтернатив возможно провести анализ альтернатив, включающий в себя [15, 16]:

- формирование оценок альтернатив по показателям из набора  $Q \setminus C$ ;
- уменьшение количества альтернатив  $X$  до множества допустимых  $XU$ ;
- выработка оценок допустимых по обобщенному показателю  $G$  альтернатив из множества  $XU$ .

### Результаты и их обсуждение

В настоящем разделе представлены результаты применения методики формирования характеристик информационного обеспечения СУ БАТС на примере реальной транспортной задачи с применением БАТС.

Определение концепции функционирования БАТС

Содержательное описание задачи: существует набор «потребителей», распределенных в пространстве (стоки), передающих в центр обработки заявки на получение материальных средств в плановом или срочном порядке. Кроме того, существует также множество пунктов хранения грузов с известными координатами. Доставка грузов осуществляется множеством транспортных БЛА (каждый из которых характеризуется текущим местоположением, состоянием занятости (выполнения задачи), а также набором других и летно-технических и летно-эксплуатационных параметров) по маршрутам (маршрутная сеть) с известными координатами и эшелонами высот.

Целями (ключевыми эксплуатационными характеристиками) СУ БАТС для рассматриваемой задачи являются:

- построение и оптимизация плана транспортировки грузов;

- мониторинг и управление реализацией плана транспортировки;

- обеспечение безопасности полетов (минимизация количества авиационных событий) при реализации плана транспортировки.

Рассмотрим подробнее цель, связанную с обеспечением безопасности полетов. В контексте рассматриваемой задачи она может быть более детально описана с помощью следующего множества частных целей [30-36]:

- предоставление БЛА данных для вылета/захода на посадку, о погодных условиях и др.;

- оценка и выбор воздушных трасс;

- выбор режимов полетов БЛА;

- отслеживание состояния внешней среды;

- контроль периодичности получения, корректности и достоверности данных о местоположении БЛА;

- контроль периодичности получения, корректности и достоверности данных о траектории следования БЛА;

- контроль следования БЛА назначенным маршрутом;

- контроль следования назначенным маршрутом и прохождения контрольных точек;

- контроль параметров полета и навигационных параметров;

- контроль предоставления локальных/глобальных координат элементами воздушного компонента БАТС;

- выявление траекторий и режимов движения, ведущих к столкновению с земной поверхностью и с другими летательными аппаратами, и предполагаемых точек столкновения;

- оценка возможности и сроков совершения БЛА для уклонения от столкновения;

- формирование и выдача команд на увод БЛА от точки прогнозируемого столкновения с другими летательными аппаратами или препятствиями;

- обеспечение кибербезопасности на аппаратном и программном уровнях.

#### Архитектурное проектирование и анализ

Определим необходимый набор подсистем, присутствие которых в СУ БАТС требуется для реализации выделенных обобщенных функций: отказоустойчивости и надежности, информационной и кибербезопасности, безопасности связи, безопасности навигационного обеспечения и безопасности управления и системы управления.

Определим необходимый набор модулей, входящих в состав каждой подсистемы (табл. 1) [15-21, 26-33].

Выявленные подсистемы и модули БАТС позволяют сформировать четыре варианта (реализации) функциональной архитектуры подсистем СУ БАТС, представленные в табл. 2.

На основе данных из табл. 2 было принято решение о использовании второго варианта (реализации) функциональной архитектуры подсистем СУ БАТС.

**Таблица 1.** Модули подсистем СУ БАТС, связанные с обеспечением безопасности полетов**Table 1.** Subsystem modules of UATS CS related to flight safety

Подсистема / Subsystem	Набор модулей / Set of modules
Подсистема отказоустойчивости и надежности	Подсистема контроля времени и режимов работы компонентов, элементов и подсистем БАТС
	Подсистема хранения в электронном виде априорных данных о значениях наработки на отказ для компонентов, элементов и подсистем БАТС (в соответствии с паспортами или другой технической документации)
	Подсистема детектирования сбоев/отказов/неисправностей БАТС, ее компонентов, элементов и подсистем
	Модуль хранения данных о критически важных активах БАТС
	Резервные подсистемы (элементы) или информационные потоки БАТС
	Модуль хранения данных о схемах и алгоритмах переключения на резервные подсистемы (элементы) или информационные потоки
	Подсистема классификации сбоев/отказов/неисправностей БАТС и восстановления неисправностей
Подсистема информационной и кибербезопасности	Подсистема журналирования инцидентов безопасности
	Модуль хранения данных об аппаратных и программных уязвимостях
	Модуль сканирования безопасности
	Подсистема текущего контроля СУ БАТС
	Модуль хранения данных о критически важных активах БАТС
	Подсистема детектирования неисправностей БАТС и ее компонентов
	Подсистема классификации неисправностей БАТС и восстановления неисправностей
Модуль хранения данных о средствах и методах защиты информации и противодействия угрозам	
Подсистема безопасности по связи	Подсистема текущего контроля СУ БАТС
	Подсистема оценки уровня сигнала и параметров канала связи
	Подсистема маршрутизации данных
	Подсистема помехоустойчивого кодирования
	Подсистема шифрования и дешифрования данных
	Модуль хранения данных о резервных каналах и частотах
Подсистема безопасности по навигационному обеспечению	Подсистема текущего контроля СУ БАТС
	Подсистема навигации БЛА
	Подсистема корректоров
	Подсистема управления наземной инфраструктуры БАТС
	Подсистема управления группы/комплекса БЛА
Подсистема безопасности управления и системы управления	Подсистема текущего контроля СУ БАТС
	Подсистема принятия решений СУ БАТС
	Подсистема прогнозирования и построения гипотез СУ БАТС
	Подсистема планирования траекторий СУ БАТС
	Подсистема управления воздушным движением СУ БАТС

Таблица 2. Варианты функциональных архитектур СУ БАТС

Table 2. Variants of UATS CS functional architectures

Показатель функционирования / The indicator of functioning	Набор модулей / Set of modules	Реализация для варианта функциональной архитектуры / Implementation for a variant of the functional architecture			
		1	2	3	4
Отказоустойчивость и надежность	Подсистема контроля времени и режимов работы компонентов, элементов и подсистем БАТС	+	+	+	+
	Подсистема хранения в электронном виде априорных данных о значениях наработки на отказ для компонентов, элементов и подсистем БАТС	+	+	+	+
	Подсистема детектирования сбоев/отказов/неисправностей БАТС, ее компонентов, элементов и подсистем	+	+	+	+
	Модуль хранения данных о критически важных активах БАТС	+	+	+	+
	Резервные подсистемы (элементы) или информационные потоки БАТС	+	+	+	+
	Модуль хранения данных о схемах и алгоритмах переключения на резервные подсистемы (элементы) или информационные потоки	+	+	+	+
	Подсистема классификации сбоев/отказов/неисправностей БАТС и восстановления неисправностей	+	+	+	+
Информационная и кибербезопасность	Подсистема журналирования инцидентов безопасности	+	+	-	+
	Модуль хранения данных из баз знаний об аппаратно-программных уязвимостях	+	+	-	+
	Модуль, отвечающий за сканирование безопасности	+	+	-	+
	Подсистема текущего контроля СУ БАТС	+	+	+	+
	Модуль хранения данных о критически важных активах БАТС	+	+	+	+
	Подсистема детектирования неисправностей БАТС и её компонентов	+	+	+	+
	Подсистема классификации неисправностей БАТС и восстановления неисправностей	+	+	+	+
	Модуль хранения данных о средствах и методах защиты информации и противодействия угрозам	+	+	-	+
Безопасность по связи	Подсистема текущего контроля СУ БАТС	+	+	+	+
	Подсистема оценки уровня сигнала и параметров канала связи	+	+	+	+
	Подсистема маршрутизации данных	+	+	+	+
	Подсистема помехоустойчивого кодирования	+	+	+	+
	Подсистема шифрования и дешифрования данных	+	+	+	+
	Модуль хранения данных о резервных каналах и частотах	-	+	+	-

Показатель функционирования / The indicator of functioning	Набор модулей / Set of modules	Реализация для варианта функциональной архитектуры / Implementation for a variant of the functional architecture			
		1	2	3	4
Безопасность по навигационному обеспечению	Подсистема текущего контроля СУ БАТС	+	+	+	+
	Подсистема навигации БЛА	-	+	+	+
	Подсистема корректоров	-	+	+	+
	Подсистема управления наземной инфраструктуры БАТС	-	+	+	-
	Подсистема управления группы/комплекса БЛА	-	+	+	-
Безопасность управления и системы управления	Подсистема текущего контроля СУ БАТС	+	+	+	+
	Подсистема принятия решений СУ БАТС	+	+	+	+
	Подсистема прогнозирования и построения гипотез СУ БАТС	+	+	+	+
	Подсистема планирования траекторий СУ БАТС	+	+	+	+
	Подсистема управления воздушным движением СУ БАТС	+	+	+	+

Определение основных и вспомогательных характеристик информационного обеспечения (учитывая выделенные подсистемы)

Ключевыми характеристиками информационного обеспечения СУ БАТС будут являться состав и параметры измерения вектора(ов) наблюдения, а также способы организации передачи и хранения информации в СУ БАТС.

Способы организации передачи и хранения информации в СУ БАТС характеризуются следующими основными показателями:

- вероятность сохранения работоспособности при отказе одной или нескольких подсистем;
- устойчивость каналов связи к подавлению и помехам;

- устойчивость каналов связи к кибератакам;

- степень избыточности каналов связи;

- точность предоставления навигационных данных.

Для выбранного варианта архитектуры определим характеристики информационного обеспечения СУ БАТС для обеспечения безопасности полетов при реализации функций интеллектуального управления [21, 23, 29, 31-36]:

1. Основные:

- состояние функционирования СУ БАТС и ее компонентов – исправно/неисправно;

- прогнозное значение работоспособности СУ БАТС в течение N часов – вероятность X ч-1;

- состояние подсистем (модулей) кибербезопасности – исправно/неисправно;
- количество текущих (совершаемых) атак;
- количество необработанных угроз;
- количество аутентифицированных агентов в сети БАТС;
- отношение сигнал/шум (ОСШ) в канале управления;
- ОСШ сигнала глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС);
- ОСШ в канале управления, телеметрии, передачи видеоданных;
- текущее состояние доступности абонентов (СУ БАТС, лидеры в группах/комплексах и т.д.) – логическое значение;
- текущая и средняя задержка по всем каналам;
- коэффициент потери пакетов по всем каналам;
- доступность/работоспособность инерциальной навигационной системы (ИНС);
- доступность/работоспособность ГНСС;
- доступность/работоспособность магнитометра и высотомера;
- текущая точность определения местоположения (м);
- текущее отклонение реальной траектории движения с запланированной (целевой);
- текущая расчетная вероятность наступления неработоспособности БАТС;
- текущая расчетная вероятность столкновения БЛА в воздухе с другими БЛА/летательными аппаратами/препятствиями.

## 2. Вспомогательные (дополнительные):

- количество происшествий за период работы;
- прогнозное значение выхода из строя  $i$ -го элемента в течение  $N$  часов – вероятность  $X$  ч-1;
- дата последней проверки аппаратно-программных комплексов СУ БАТС на наличие вредоносного программного обеспечения;
- состояние портов, информационных ресурсов и пр.;
- индикатор совершения атаки DoS («отказ в доступе»);
- количество инцидентов попыток несанкционированной аутентификации субъектов в сети БАТС;
- состояние функционирования модулей связи, трактов и специального программного обеспечения для связи;
- текущая и средняя скорость передачи данных по всем каналам;
- текущее количество абонентов в сети БАТС;
- значения углов крена, тангажа и рыскания, угловые скорости и ускорения – от ИНС;
- точность определения значений углов крена, тангажа и рыскания, угловые скорости и ускорения;
- местоположение объекта в локальных координатах (ИНС);
- местоположение объекта в глобальных координатах (ГНСС);
- данные от наземной станции управления о новом (скорректированном) маршруте полета;

- текущие временные показатели для ПИД-регулятора (нарастание и стабилизация переходного процесса и пр.);
- отклонение при построении траектории полета;
- текущая расчетная вероятность отказа  $i$ -го элемента, могущего привести к наступлению авиационного события.

#### Оценка влияния функциональных требований на целевые показатели функционирования СУ БАТС

Оценка влияния функциональных требований (требований к характеристикам техники и технологий) на целевые показатели функционирования СУ БАТС осуществляется на основе когнитивного подхода и методов многокритериального анализа решений.

Результаты оценки влияния функциональных требований (требований к характеристикам техники и технологий) на показатели функционирования СУ БАТС в интересах обеспечения безопасности полетов получены в виде распределения приоритетов функциональных требований (табл. 3). Приоритеты являются абсолютными, и отражают уровни значимости (степени важности) различных требований для обеспечения целевых значений показателей функционирования с учетом приоритетов последних.

Полученные результаты оценки влияния функциональных требований (требований к характеристикам техники и технологий) на показатели функционирования СУ БАТС дают возможность задать приоритеты реализации модулей в составе подсистем СУ БАТС. Так, пу-

тем выбора и задания границ значений приоритетов выполняется разделение функциональных требований по уровням приоритетности. На основе этого определяются уровни приоритетности реализации функциональных модулей в составе СУ БАТС. Например, можно выделить следующие уровни приоритетности: высокий (обязательная реализация модуля), средний (целесообразная реализация), низкий (опциональная реализация). Затем определяются варианты реализации подсистем в составе СУ БАТС: максимальный (реализация всех заявленных модулей в составе подсистемы); компромиссный (реализация модулей с высоким и средним приоритетом); минимальный (реализация только модулей с низким приоритетом) [14-27].

#### Выводы

В работе предложена методика формирования требований к характеристикам информационного обеспечения функционирования СУ БАТС для обеспечения безопасности полетов, представлены ее основные этапы. Предложенная методика позволяет формировать требования к информационному обеспечению СУ БАТС и его характеристикам, исходя из целевого назначения системы и ее функциональной архитектуры (в том числе к составу и структуре информационных потоков, формату представления и передачи данных, частоты предоставления информации и т.д.) для обеспечения требуемой адекватности, полноты и своевременности предоставления информации, требуемой для принятия решений.

**Таблица 3.** Результаты оценки влияния функциональных требований на показатели функционирования СУ БАТС**Table 3.** Results of the evaluation of the impact of functional requirements on the performance of UATS CS

Функциональные требования (средства реализации обобщенных функций/требования к характеристикам техники и технологий) / Functional requirements (means of implementing generalized functions/requirements for the characteristics of equipment and technologies)	Показатели функционирования и их приоритеты / Performance indicators and their priorities					Глобальные приоритеты / Global priorities
	Отказоустойчивость и надежность / Fault tolerance and Reliability	Информационная и кибербезопасность / Information and Cybersecurity	Безопасность по связи / Communication Security	Безопасность по навигационному обеспечению / Navigation Security	Безопасность управления и системы управления / Management and Control	
	0,298	0,158	0,158	0,089	0,298	
Блок контроля времени и режимов работы компонентов БАТС	0,567	-	-	-	-	0,472
Априорные данные о значениях наработки на отказ компонентов БАТС	0,315	-	-	-	-	0,262
Блок детектирования неисправностей БАТС и ее компонентов	0,810	0,567	-	-	-	0,924
Перечень критически важных активов БАТС	0,405	0,315	-	-	-	0,476
Резервные элементы или информационные потоки БАТС	0,729	-	-	-	-	0,606
Схемы переключения на резервные элементы или информационные потоки	0,729	-	-	-	-	0,606
Блок классификации неисправностей БАТС и восстановления неисправностей	0,510	0,567	-	-	-	0,674
Блок журналирования инцидентов безопасности	-	0,810	-	-	-	0,357
Данные из баз знаний об аппаратно-программных уязвимостях	-	0,567	-	-	-	0,250
Сканеры безопасности	-	0,729	-	-	-	0,322
Подсистема текущего контроля СУ БАТС	-	0,441	0,630	0,225	0,567	1,000

Функциональные требования (средства реализации обобщенных функций/требования к характеристикам техники и технологий) / Functional requirements (means of implementing generalized functions/requirements for the characteristics of equipment and technologies)	Показатели функционирования и их приоритеты / Performance indicators and their priorities					Глобальные приоритеты / Global priorities
	Отказоустойчивость и надежность / Fault tolerance and Reliability	Информационная и кибербезопасность / Information and Cybersecurity	Безопасность по связи / Communication Security	Безопасность по навигационному обеспечению / Navigation Security	Безопасность управления и системы управления / Management and Control	
	0,298	0,158	0,158	0,089	0,298	
Средства и методы защиты информации и противодействия угрозам	-	0,6300	-	-	-	0,278
Блок оценки уровня сигнала и параметров канала связи	-	-	0,441	-	-	0,195
Блок маршрутизации данных	-	-	0,405	-	-	0,179
Блок помехоустойчивого кодирования	-	-	0,567	-	-	0,250
Блок шифрования и дешифрования данных	-	-	0,441	-	-	0,195
Резервные каналы и частоты	-	-	0,567	-	-	0,250
Микроконтроллер связи	-	-	0,189	-	-	0,083
Навигационная подсистема БЛА	-	-	-	0,729	-	0,181
СУ наземной инфраструктуры БАТС	-	-	-	0,0900	-	0,022
СУ группы/комплекса БЛА	-	-	-	0,360	-	0,089
ИНС, ГНСС, корректоры БЛА	-	-	-	0,729	-	0,181
Подсистема принятия решений СУ БАТС	-	-	-	-	0,630	0,524
Человеко-машинный интерфейс СУ БАТС	-	-	-	-	0,350	0,291
Подсистема прогнозирования и построения гипотез СУ БАТС	-	-	-	-	0,810	0,674
Подсистема планирования траекторий СУ БАТС	-	-	-	-	0,270	0,225
Подсистема управления воздушным движением СУ БАТС	-	-	-	-	0,270	0,225

Рассмотрены и описаны основные задачи, решаемые на этапе определения концепции, в том числе оценка требований к показателям функционирования, описание функциональной архитектуры и физической реализации, а также их валидация.

В рамках архитектурного проектирования и анализа определен набор подсистем, присутствие которых в СУ БАТС требуется для реализации выделенных обобщенных функций и соответствия функциональным требованиям на основе выбранных целевых показателей. Определен набор модулей, входящих в состав каждой подсистемы и отвечающий за реализацию безопасности СУ БАТС. Проанализированы преимущества и недостатки различных вариантов функциональной архитектуры подсистем СУ БАТС, с учетом функциональных требований. Рассмотрен вариант полнофункциональной реализации всех подсистем, а также варианты частичной реализации модулей в составе подсистем, с учетом приоритетности реализуемых ими функций, а также

различных форм компромисса между обеспечением тех или иных групп функциональных требований.

На основе результатов формирования концепции и архитектурного проектирования и анализа обобщены и представлены основные и вспомогательные характеристики информационного обеспечения СУ БАТС, учитывая набор подсистем и модулей, предусмотренных выбранной функциональной архитектуры системы. Показано, что проблему оценки влияния характеристик информационного обеспечения на показатели функционирования технологий интеллектуальной автоматизации управления БАТС следует рассматривать как слабо структурированную, и для ее решения целесообразно применение когнитивного подхода и методов многокритериального анализа решений.

Применение предложенной методики формирования характеристик информационного обеспечения СУ БАТС показано на примере реальной транспортной задачи с применением БАТС.

### Список литературы

1. Новиков Д.А. Классификации систем управления // Проблемы управления. 2019; 4: 27-42.
2. Синтез интеллектуальных автоматизированных систем управления сложными технологическими процессами / С. Орешкин, А. Спесивцев, И. Дайманд, В. Козловский, В. Лазарев // Автоматизация в промышленности. 2013; 7: 3-9.
3. Качала В.В. Общая теория систем и системный анализ. М.: Горячая линия – Телеком, 2017.
4. Филимонюк Л.Ю. Модели повышения безопасности авиационных систем в условиях критических сочетаний событий // Труды 8-й Всероссийской научно-

практической конференции «Системы управления электротехническими объектами». Тула, 2018; 8: 157-161.

5. Jharko E., Abdulova E., Iskhakov A. Unmanned Vehicles: Safety Management Systems and Safety Functions. *Futuristic Trends in Network and Communication Technologies // FTNCT 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1396: 112-121. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1483-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1483-5_11).

6. Полтавский А.В., Рякин А.В. Обеспечение безопасности полетов беспилотных летательных аппаратов // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2007; 119: 152-157.

7. Прототип системы обеспечения траекторной безопасности полета / Б.С. Алешин, С.Г. Баженов, В.Г. Лебедев, Е.Л. Кулида // *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014)*. М., 2014. С. 3351-3361.

8. Белый О.В., Малыгин И.Г., Цыганов В.В. Интеллектуальные транспортные системы: концептуальные основы построения // *Материалы 7-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2013)*. М., 2013; т.1, с. 20-22.

9. Бузиков М.Э., Васильев С.Н. Гибридная технология интеллектуального управления // *Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения»*. М., 2018. С. 112-114.

10. Применение гибридных методов в интеллектуальных системах управления / А.Ф. Пащенко, Ф.Ф. Пащенко, А.Д. Вислогузов, Ф.В. Морозов, Л.Д. Хижинская, С.В. Гуляев // *Датчики и системы*. 2023; 2: 51-58.

11. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и Программно-математическое обеспечение // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016; 1(174): 29-44.

12. Интеллектуальная система управления автономным беспилотным летательным аппаратом / В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов, И.Б. Гарцев, Д.В. Евстигнеев, К.С. Колядин // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2006; 3: 141-143.

13. Иванец В.М., Лукьянчик В.Н., Мельник В.Н. Особенности управления беспилотными летательными аппаратами в составе беспилотной интеллектуальной авиационной системы на основе технологий искусственного интеллекта // *Военная мысль*. 2022; 9: 100-109.

14. Подвесовский А.Г., Лагереv Д.Г., Коростелев Д.А. Применение нечетких когнитивных моделей для формирования множества альтернатив в задачах принятия решений // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2009; 4(24): 77-84.

15. Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Построение оптимальной метафоры визуализации нечетких когнитивных карт на основе формализованных критериев когнитивной ясности // *Научная визуализация*. 2019; 11(4): 115-129.

16. Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Математическое и программное обеспечение поддержки когнитивного моделирования слабоструктурированных организационно-технических систем // *Международная конференция СРТ2019*. Нижний Новгород, 2019. С. 131-141.

17. Zakharova A., Podvesovskii A. Model for Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs, Taking into Account the Priority of Delivery Tasks / Agriculture Digitalization and Organic Production. ADOP 2023. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2023; 362: 257-268. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0_24).

18. Zakharova A., Podvesovskii A. Application of Visual-Cognitive Approach to Decision Support for Concept Development in Systems Engineering // IFAC-PapersOnLine. 2021; 54(13): 482-487. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.495>.

19. Щербатов И.А. Автономность функционирования и степень интеллектуальности сложных технических систем // Информатика и системы управления. 2016; 3(49): 105-118. <https://doi.org/10.22250/isu.2016.49.105-118>.

20. Клименко А.Б. Повышение ресурсной эффективности распределенных архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023;27(2):124-139. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139>.

21. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление транспортными системами // Economic Consultant. 2016; 3(15): 26-32.

22. Мартышкин А.И., Кириюткин И.А., Мереняшева Е.А. Автотестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023;27(1):140-152. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-140-152>.

23. Агеев А.М., Попов А.С. Требования к надежности бортовых комплексов управления беспилотных летательных аппаратов различного класса // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018; 7(7): 95-101.

24. Клименко А.Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022;26(1):57-72. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72>.

25. Analysis and Determination of Minimum Requirements of an Autopilot for the Control of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). Advances and Applications in Computer Science, Electronics and Industrial Engineering / H. Loya, V. Enríquez, F.W. Salazar, C. Sánchez, F. Urrutia, J. Buele // CSEI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020; 1078: 129-142. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_9).

26. Макаров М.В., Астафьев А.В., Семенов И.А. Исследование интеллектуальных элементов управления мобильным роботом и обеспечение информационной безопасности процесса его функционирования в динамической среде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022;26(2):72-86. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-72-86>.

27. SongWei F., HongWei B. The application requirement analysis and system design of shipborne small multi-rotors unmanned aerial vehicle // Proceedings 2013 International Con-

ference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC). 2013; 2812-2816. <https://doi.org/10.1109/MEC.2013.6885508>.

28. Андронов В.Г., Чуев А.А., Юдин И.С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022;26(2):122-141. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-122-141>.

29. Beainy F., Mai A., Commuri S. Unmanned Aerial Vehicles operational requirements and fault-tolerant robust control in level flight // 17th Mediterranean Conference on Control and Automation. 2009; 700-705. <https://doi.org/10.1109/MED.2009.5164625>.

30. Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э., Ковалев В.В. Особенности поддержки принятия управленческих решений в системе управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 107-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-107-122>.

31. Агеев А.М., Макаров И.В. Методика синтеза программно-аппаратных комплексов автоматизированной разработки систем управления полетом беспилотных летательных аппаратов // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2016; 8: 1267-1278.

32. Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 136-151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>.

33. Dalamagkidis K., Valavanis K.P., Piegł L.A. UAS Safety Assessment and Functional Requirements. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System // Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering. 2012; 54: 91-123. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2479-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2479-2_5).

34. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 145-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.

35. Инсаров В.В., Тихонова С.В., Дронский С.А. Концепция построения интеллектуальных систем управления автономных беспилотных летательных аппаратов с реализацией функции ситуационной осведомленности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018; 19(2): 111-119. <https://doi.org/10.17587/mau.19.111-119>.

36. Нгуен В.В., Усина Е.Е. Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 200-216. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-200-216>.

## References

1. Novikov D.A. Klassifikatsii sistem upravleniya [Classification of control systems]. *Problemy upravleniya = Management Problems*. 2019; 4: 27-42.

2. Oreshkin S., Spesivtsev A., Daimand I., Kozlovskiy V., Lazarev V. Sintez intellektual'nykh avtomatizirovannykh sistem upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi protsessami [Synthesis of intelligent automated control systems of complex technological processes]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*. 2013; 7: 3-9.

3. Kachala V.V. *Obshchaya teoriya sistem i sistemnyi analiz* [General System Theory and System Analysis]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2017.

4. Filimonyuk L.Yu. [Models for improving aviation safety in critical combinations of events]. *Trudy 8-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sistemy upravleniya elektrotekhnicheskimi ob"ektami»* [Proceedings of the 8th All-Russian Scientific and Practical Conference "Control systems of electrical facilities"]. Tula, 2018; 8: 157-161 (In Russ.).

5. Jharko E., Abdulova E., Iskhakov A. Unmanned Vehicles: Safety Management Systems and Safety Functions. *Futuristic Trends in Network and Communication Technologies. FTNCT 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1396: 112-121. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1483-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1483-5_11).

6. Poltavskiy A.V., Ryakin A.V. Obespechenie bezopasnosti poletov bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Aviation safety of unmanned aerial vehicles]. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MGTU GA*. 2007; 119: 152-157.

7. Aleshin B.S., Bazhenov S.G., Lebedev V.G., Kulida E.L. [Flight Path Safety Prototype System]. *Trudy XII Vserossijskogo soveshchaniya po problemam upravleniya (VSPU-2014)* [Proceedings of the XII All-Russian Conference on Management Problems (VSPU-2014)]. Moscow, 2014. P. 3351-3361 (In Russ.).

8. Belyi O.V., Maligin I.G., Tsiganov V.V. [Intelligent Transport Systems: Conceptual Framework]. *Materialy 7-j Mezhdunarodnoi konferencii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» (MLSD-2013)*. [Proceedings of the 7th International Conference "Managing the Development of Large-scale Systems" (MLSD-2013)]. Moscow, 2013, vol. 10, pp. 1: 20-22 (In Russ.).

9. Buzikov M.E., Vasil'ev S.N. [Hybrid intelligent control technology]. *Tezisy dokladov nauchnoj konferencii «Lomonosovskie chteniya»* [Abstracts of the scientific conference "Lomonosov readings"]. Moscow, 2018, pp. 112-114 (In Russ.).

10. Pashchenko A.F., Pashchenko F.F., Visloguzov A.D., Morozov F.V., Khizhinskaya L.D., Gulyaev S.V. Primenenie gibridnykh metodov v intellektual'nykh sistemakh upravleniya [Application of hybrid methods in intelligent control systems]. *Datchiki i sistemy = Sensors and System*. 2023; 2: 51-58.

11. Evdokimenko V.N., Krasil'shchikov M.N., Sebryakov G.G. Raspredeleonnaya intellektual'naya sistema upravleniya gruppoy bespilotnykh letatel'nykh apparatov: arkhitektura i Programmno-matematicheskoe obespechenie [Distributed Intelligent Group Control System for Unmanned Aerial Vehicles: Architecture and Software and Mathematical Support]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = News of the Southern Federal University. Technical Sciences*. 2016; 1(174): 29-44.

12. Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P., Gartseev I.B., Evstigneev D.V., Kolyadin K.S. Intellektual'naya sistema upravleniya avtonomnym bespilotnym letatel'nyim apparatom [Intelligent control system for autonomous unmanned aerial vehicle]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical Sciences*. 2006; 3: 141-143.

13. Ivanets V.M., Lukyanchik V.N., Mel'nik V.N. Osobennosti upravleniya bespilotnymi letatel'nyimi apparatami v sostave bespilotnoi intellektual'noi aviatsionnoi sistemy na osnove tekhnologii iskusstvennogo intellekta [Features of control of unmanned aerial vehicles as part of an unmanned intelligent aviation system based on artificial intelligence technologies]. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2022; 9: 100-109.

14. Podvesovskii A.G., Lagerev D.G., Korostelev D.A. Primenenie nechetkikh kognitivnykh modelei dlya formirovaniya mnozhestva al'ternativ v zadachakh prinyatiya reshenii [Applying Fuzzy Cognitive Models to Form Many Alternatives in Decision Making Tasks]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2009; 4(24): 77-84.

15. Podvesovskii A.G., Isaev R.A. Postroenie optimal'noi metafory vizualizatsii nechetkikh kognitivnykh kart na osnove formalizovannykh kriteriev kognitivnoi yasnosti [Constructing an Optimal Metaphor for Visualizing Fuzzy Cognitive Maps Based on Formalized Cognitive Clarity Criteria]. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*. 2019; 11(4): 115-129.

16. Zakharova A.A., Podvesovskii A.G., Isaev R.A. [Mathematical and software support cognitive modeling of loosely structured organizational and technical systems]. *Mezhdunarodnaya konferenciya CPT2019* [International Conference CPT2019]. Nizhniy Novgorod, 2019, pp. 131-141 (In Russ.).

17. Zakharova A., Podvesovskii A. Model for Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs, Taking into Account the Priority of Delivery Tasks. *Agriculture Digitalization and Organic Production. ADOP 2023. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023; 362: 257-268. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4165-0_24).

18. Zakharova A., Podvesovskii A. Application of Visual-Cognitive Approach to Decision Support for Concept Development in Systems Engineering. *IFAC-PapersOnLine*. 2021; 54(13): 482-487. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.495>.

19. Sherbatov I.A. Avtonomnost' funktsionirovaniya i stepen' intellektual'nosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Informatika i sistemy upravleniya [Operational autonomy and degree of sophistication of complex technical systems]. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer science and management systems*. 2016; 3(49): 105-118. <https://doi.org/10.22250/isu.2016.49.105-118> (In Russ.).

20. Klimenko A.B. Distributed Data Proceeding Systems Architectures Resource Efficiency Improvement on the Basis of Apriory Data about the Jobs Late Completion Times. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 124-139 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139>

21. Rozenberg I.N. Intellektual'noe upravlenie transportnymi sistemami [Intelligent management of transport systems]. *Economic Consultant*. 2016; 3(15): 26-32 (In Russ.).
22. Martyshkin A.I., Kiryutkin I.A., Merenyasheva E.A. Autotesting an Embedded Reconfigurable Computing System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023;27(1):140-152 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-140-152>
23. Ageev A.M., Popov A.S. Trebovaniya k nadezhnosti bortovykh kompleksov upravleniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov razlichnogo klassa [Reliability requirements for on-board control systems for unmanned aerial vehicles of different classes]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice*. 2018; 7(7): 95-101 (In Russ.).
24. Klimenko A.B. A Technique of the Distributed Information Systems Control Method Choice under the High Network Dynamics Conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022;26(1):57-72 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72>
25. Loya H., Enríquez V., Salazar F.W., Sánchez C., Urrutia F., Buele J. Analysis and Determination of Minimum Requirements of an Autopilot for the Control of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Advances and Applications in Computer Science, Electronics and Industrial Engineering. CSEI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 1078: 129-142. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_9).
26. Makarov M.V., Astafiev A.V., Semenov I.A. The Study of Intelligent Control Elements of a Mobile Robot and Ensuring Information Security of the Process of Its Functioning in a Dynamic Environment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022;26(2):72-86 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-72-86>
27. SongWei F., HongWei B. The application requirement analysis and system design of shipborne small multi-rotors unmanned aerial vehicle. *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*. 2013; 2812-2816. <https://doi.org/10.1109/MEC.2013.6885508>.
28. Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for Determining Deviations of Pilotless Aircraft from a Given Trajectory by Parallaxes of Underlying Surface Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022;26(2):122-141 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-122-141>
29. Beainy F., Mai A., Commuri S. Unmanned Aerial Vehicles operational requirements and fault-tolerant robust control in level flight. *17th Mediterranean Conference on Control and Automation*. 2009; 700-705. <https://doi.org/10.1109/MED.2009.5164625>.
30. Averchenkov A. V., Averchenkova E. E. Kovalev V. V., Characteristic Features of Support for Making Managerial Decisions in the Management System of Logistics Flows of Transportation and Storage Complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universi-*

*teta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 107-122 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-107-122>.

31. Ageev A.M., Makarov I.V. Metodika sinteza programmno-apparatnykh kompleksov avtomatizirovannoi razrabotki sistem upravleniya poletom bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Method of synthesis of software and hardware complexes of automated development of flight control systems of unmanned aerial vehicles]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii = SFU Magazine. Engineering and Technology*. 2016; 8: 1267-1278 (In Russ.).

32. Klimenko A.B. Choosing methodology of how to manage distributed information systems under conditions of high dynamics of network infrastructure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 136-151 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>

33. Dalamagkidis K., Valavanis K.P., Piegl L.A. UAS Safety Assessment and Functional Requirements. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System. *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*. 2012; 54: 91-123. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2479-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2479-2_5).

34. Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A. Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 145-161 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

35. Insarov V.V., Tikhonova S.V., Dronskiy S.A. Kontseptsiya postroeniya intellektual'nykh sistem upravleniya avtonomnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s realizatsiei funktsii situatsionnoi osvedomlennosti [Concept of intelligent control systems for autonomous unmanned aerial vehicles with situational awareness function]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Management*. 2018; 19(2): 111-119. <https://doi.org/10.17587/mau.19.111-119> (In Russ.).

36. Nguyen V. V., Usina E. E. Dynamic Models of Unmanned Aerial Vehicle Manipulator Control and Stabilization. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 200-216 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-200-216>.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Мамченко Марк Владиславович**, научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: [markmamcha@gmail.com](mailto:markmamcha@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

**Mark V. Mamchenko**, Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: [markmamcha@gmail.com](mailto:markmamcha@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

## Когнитивный подход к разработке расписаний занятий на основе модификации генетического алгоритма

Л. А. Лисицин<sup>1</sup> ✉, А.Л. Лисицин<sup>2</sup>, А. Л. Лисицин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Курский государственный университет  
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: leo\_263@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Поиск возможностей и ограничений использования когнитивных технологий (КТ) для решения слабоформализованных (творческих) задач в различных областях. Оценка эффективности КТ применения по сравнению с традиционными методами. Анализ применения КТ на основе генетических алгоритмов для оптимизации процессов и решения сложных слабоформализованных задач на примере составления расписания школы.

**Методы.** Использование генетического алгоритма (ГА) для составления расписания путем комбинирования и вариаций данными, подобно эволюционному отбору в природе.

**Результаты.** В результате проведенного программного моделирования с использованием ГА получен вариант расписания для типичной средней городской школы, учитывающий все нормы "школьного" СанПиН и пожелания учителей, отличающийся простотой в использовании и гибкостью при добавлении новых ограничений, а также высокой скоростью работы на обычных офисных компьютерах.

**Заключение.** Актуальность использования генетических алгоритмов для составления расписаний заключается в быстром автоматическом поиске оптимального или приемлемого решения в большом пространстве возможных вариантов, с учетом установленных ограничений и приоритетов, а также в гибкости и адаптивности для различных типов задач.

**Ключевые слова:** когнитивное моделирование; генетический алгоритм; программирование; моделирование; метод случайного подбора данных; автоматизация; составление расписаний; автоматическая генерация; задачи оптимизации.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Лисицин Л. А., Лисицин А.Л., Лисицин А. Л. Когнитивный подход к разработке расписаний занятий на основе модификации генетического алгоритма // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 148-162. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-148-162>.

Поступила в редакцию 23.11.2023

Подписана в печать 21.02.2024

Опубликована 27.03.2024

© Лисицин Л. А., Лисицин А.Л., Лисицин А. Л., 2024

## The Use of Artificial Intelligence In Applied Tasks of the Modern Information Society

Leonid A. Lisitsin <sup>1</sup> ✉, Alexander L. Lisitsin <sup>2</sup>, Alexey L. Lisitsin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Kursk State University  
33, Radishcheva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: leo\_263@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The search for the possibilities and limitations of using artificial intelligence (AI) to solve poorly formalized (creative) tasks in various fields. Evaluation of the effectiveness of AI application in comparison with traditional methods. Analysis of the use of artificial intelligence based on genetic algorithms to optimize processes and solve complex poorly formalized tasks using the example of school scheduling.

**Methods.** Using a genetic algorithm (GA) to schedule by combining and varying data is similar to evolutionary selection in nature.

**Results.** As a result of the conducted software modeling using GA, a variant of the schedule for a typical urban secondary school was obtained, taking into account all the norms of the "school" SanPiN and the wishes of teachers, characterized by ease of use and flexibility when adding new restrictions, as well as high speed on ordinary office computers.

**Conclusion.** The relevance of using genetic algorithms for scheduling lies in the rapid automatic search for the optimal or acceptable solution in a large space of possible options, taking into account the established limitations and priorities, as well as flexibility and adaptability for various types of tasks.

**Keywords:** artificial intelligence; genetic algorithm; programming; modeling; random data selection method; automation; scheduling; automatic generation; optimization tasks.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Lisitsin L. A., Lisitsin A. L., Lisitsin A. L. The Use of Artificial Intelligence In Applied Tasks of the Modern Information Society. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 148-162 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-148-162>.

Received 23.11.2023

Accepted 21.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

### Введение

Развитие современного общества влечет за собой появление очень сложных и больших систем [1]. Этот процесс

связан с постоянным усложнением технологических устройств в экономике, улучшением качества управления технологическими и организационными

структурами. Разработка больших систем отличается от разработки простых систем тем, что здесь возникают проблемы, которые в меньшей степени связаны с изучением свойств и принципов функционирования компонентов, и в большей степени – с выбором оптимальной структуры, оптимального способа организации взаимодействия компонентов, определением оптимальных условий функционирования. Все это приводит к увеличению числа возможных вариантов при разработке, планировании и контроле. Такие задачи стало возможным решать при помощи когнитивного моделирования [2, 3].

Для этого интеллектуальную деятельность человека стали моделировать с помощью систем искусственного интеллекта (ИИ). Существуют три основных направления ИИ: машинное обучение (включает системы программирования ИИ и языки программирования, экспертные системы), нейроподход или искусственный разум (включает нейронные сети, ассоциативное обучение и когнитивное моделирование) и эволюционные алгоритмы (включают генетические алгоритмы) [4, 5, 6].

Искусственный интеллект (ИИ) изначально можно определить как направление информатики, где используются методы и средства для решения слабоформализованных (творческих) задач [7, 8, 9]. ИИ позволяет малоподготовленному пользователю решать сложные творческие задачи, которые не поддаются формализации. КМ изучает по-

знавательные процессы, а ИИ стремится создать компьютерные системы с интеллектуальными способностями. Они взаимосвязаны и взаимно влияют друг на друга.

Генетические алгоритмы (ГА) [10, 11] являются одним из походов ИИ. ГА используют в медицине для оптимизации процессов лечения и предсказания результата заболевания [12]. Они помогают создавать новые лекарственные препараты [13].

Помимо медицины ГА могут быть эффективным инструментом для решения задачи составления расписания учебного заведения. Этот процесс представляется как оптимизационная задача, где нужно найти оптимальное распределение занятий и ресурсов [14]. Процесс продолжается до достижения оптимального или приемлемого расписания в заданном контексте. Критерии остановки могут включать фиксированное количество поколений, достижение определенного значения функции приспособленности или временные ограничения (доступность преподавателей и кабинетов, учебная нагрузка на школьников разных классов, согласно "школьным" СанПиН<sup>1</sup> [15], чередование предметов различных предметных областей

---

<sup>1</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 сентября 2020 г. N 28 "Об утверждении санитарных правил СП 2.4.3648-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи". URL: [https://base.garant.ru/75093644/#p\\_74](https://base.garant.ru/75093644/#p_74) (дата обращения: 17.10.2023).

по трудности восприятия, по загруженности «трудными» предметами в течение дня и в течение недели, пожелания учителей и многие другие). Генерация расписания происходит без высокой вычислительной сложности и заметного времени ожидания.

Эта задачу можно считать сложной, так как существуют множество ограни-

чений и вручную сделать эффективное расписание для современной школы невозможно.

В настоящее время на рынке программного обеспечения имеется большой ассортимент программ по составлению расписаний. Они представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Системы составления расписания занятий

**Table 1.** Lesson scheduling systems

Название / Title	Краткая характеристика / Brief description
«Ректор 3» (1.9 мБт, от 11800 руб за 1 лицензию за 1 год для юр_лица, учитывает требования СанПиНа)	Программа для составления расписания в средних школах, требуется сопровождение и начальное обучение
«Ректор-Школа» (1.9 мБт, от 11800 руб за 1 лицензию за 1 год для юр_лица, учитывает требования СанПиНа)	Программа для составления расписания в средних школах с профильным обучением, требуется сопровождение и начальное обучение
«Ректор-Колледж» (1.9 мБт, от 13900 руб за 1 лицензию за 1 год для юр_лица, учитывает требования СанПиНа)	Программа для составления расписания в средних специальных учебных заведениях, требуется сопровождение и начальное обучение
Программа «Timetable Wizard», компании «eTimeTable» (1.69 мБт, от 150 \$ за 1 лицензию за 1 год для юр_лица, не учитывает требования СанПиНа)	Программа для составления расписания в учебных заведениях, имеется информационная поддержка
Авторская программа на ГА. (20 кБт исполняемый файл после настройки, бесплатно, учитывает требования СанПиНа)	Программа для расписания на одну неделю для школы и колледжа, начальная настройка по инструкции

Приведенный список можно продолжать, но отсутствие данных в открытом доступе ограничивает просмотр большего числа программ. Программы линейки «Ректор» самые распространенные по использованию в России и ближнем зарубежье. По многочислен-

ным отзывам наибольшей популярностью пользуется программа «Ректор-школа»<sup>1</sup>. Программа «Timetable Wizard»

<sup>1</sup> <https://rector.spb.ru/> - «Ректор 3» — расписание занятий/уроков для школ (дата обращения: 17.10.2023).

имеет хорошие характеристики, но не учитывает оптимизацию с ограничениями СанПиНа и поэтому мало применима для школ в России. Остальные системы (которые не внесены в таблицу для сравнения) обладают следующими стандартными недостатками: большая цена программного продукта (100 тысяч рублей и более), программа требует постоянной сопроводительной поддержки от компании, из-за множества выполняемых функций требуется обучение и переобучение персонала и т.д.

### Материалы и методы

*Цель работы* – требуется разработать программу автоматического составления расписания для средней школы на языке программирования C#. Программа должна иметь низкую стоимость (или свободное распространение), высокую скорость работы (составление расписания до 1 часа на обычном офисном компьютере), проста в использовании, занимать мало памяти на компьютере.

*Научная новизна* статьи заключается в разработке эффективного алгоритма с использованием ГА для составления расписания, который учитывает многочисленные факторы: доступность преподавателей и кабинетов, разность учебной нагрузки в неделю на школьников младших и старших классов, согласно "школьным" СанПиН чередование дисциплин различных предметных областей по трудности восприятия, по загруженности «трудными» предметами в течение дня и в течение недели, поже-

ления учителей выбирать нужное им время, гибко обходить моменты, когда один преподаватель ведет разные предметы, и наоборот.

ГА позволяет находить оптимальные расписания в сложных случаях, когда другие методы не работают. Для моделирования автоматизированного составления расписаний был выбран случайный подбор. Этот метод обеспечивает высокую скорость работы за счет установленных ограничений: каждому предмету соответствует определенный преподаватель, а число параллельных классов минимизировано для уменьшения вычислительной нагрузки на менее производительные компьютеры. Расписание представляется в виде таблицы, столбцы которой соответствуют классам, а строки – допустимому времени занятий. Элементами этой таблицы являются конкретные уроки для каждого класса и времени. Результатом является матрица размером 5 x 11 (количество дней и количество классов).

Общее количество возможных уроков за неделю (максимум 5 рабочих дней по 7 уроков) составляет 385. Индекс урока определяется классом, кабинетом и уроком. Этот индекс должен быть уникальным для каждого класса (то есть, нельзя проводить два урока одновременно для одного класса), и ни один класс не может занимать два кабинета одновременно.

Суть метода. Основная идея метода состоит в преобразовании исходных данных в матрицу расписания размером

$K \times A$ , где  $K$  – количество классов,  $A$  – количество кабинетов (аудиторий)<sup>1</sup>. Матрица расписания отражает классы, уроки и кабинеты в школе. Если результат нас не устраивает, мы пробуем следующий вариант и т.д., пока не найдем подходящий. Изначально матрица заполняется случайными значениями, затем расписание улучшается в соответствии с критериями и ограничениями.

#### Алгоритм работы программы

Определение основной задачи: целью составления расписания является оптимальное распределение учебных ресурсов.

Представление расписания в виде генетической структуры: определим, как будет представлено расписание в генетической алгоритме. Для составления расписания используем следующие множества:  $D$  – учебные предметы;  $K$  – классы;  $P$  – учителя;  $T$  – время уроков. Расписание можно представить в виде декартова произведения – функции  $g = (D_i * K_k * P_l * T_p) \rightarrow \{0,1\}$ , где  $i$  – индекс предмета;  $k$  – индекс класса;  $l$  – индекс учителя;  $p$  – индекс урока. Значение  $g = 1$  означает, что указанный предмет у указанного класса проводится в указанное время учителем  $P$ . Таким

образом,  $g$  указывает, включен ли данный вариант в расписание или нет.

Для генетического алгоритма определим особь - это возможный вариант расписания. Хромосомой является один класс. Хромосома будет состоять из генов – это общее количество занятий за неделю для каждого класса. Ген - это количество уроков за неделю для каждого класса, закодированное в виде  $K33$ , где  $K$  - номер класса,  $33$  - максимальное количество уроков согласно СанПиНу.  $K01$  до  $K33$  представляют гены в двоичной системе (первое и  $33$ -е занятия соответственно).  $33$  гена для любого класса составляют хромосому, которая должна изменяться в соответствии с нашими законами (в природе - по законам эволюции) [15].

Стандартные процедуры ГА [16, 17] указаны ниже.

1. Создание начальной популяции: Сгенерируем несколько возможных вариантов расписания (особей), например, с помощью случайного выбора или использования исторических данных.

2. Оценка особей: Оценим каждую особь с помощью функции пригодности, которая учитывает такие критерии, как равномерное распределение учебной нагрузки, учет предпочтений учителей и учеников и т.д.

3. Выбор особей для скрещивания: Выберем пары особей для скрещивания на основе их пригодности (чем выше пригодность, тем больше вероятность быть выбранным для скрещивания).

<sup>1</sup> Автоматизированная информационная система для организации учебного процесса обучения в образовательных организациях "Цифровая кафедра" / Асланов Р. Э., Артемьев И.А., Макеев Д. М., Полубабкин В. П.. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022619924, 26.05.2022. Заявка № 2022618048 от 05.05.2022.



**Рис. 1.** Алгоритм составления расписания на генетическом алгоритме

**Fig. 1.** Genetic algorithm scheduling algorithm

4. Скрещивание особей: Скрещиваем выбранные пары особей, создавая новые особи с новыми вариантами расписания.

5. Мутация особей: Вносим случайные изменения в некоторые особи для увеличения разнообразия популяции.

6. Оценка новых особей: Оцениваем новые особи с помощью функции пригодности.

7. Повторяем шаги 2-6 до тех пор, пока не найдем оптимальное решение или выполним заданное количество итераций.

Пример скрещивания.

Дано: есть два варианта расписания – А и В.

Дано: есть два варианта расписания – А и В.

Вариант А:

Понедельник: Урок 1, Урок 2, Урок 3

Вторник: Урок 4, Урок 5, Урок 6

Среда: Урок 7, Урок 8, Урок 9

Четверг: Урок 10, Урок 11, Урок 12

Пятница: Урок 13, Урок 14, Урок 15

Вариант В:

Понедельник: Урок 1, Урок 2

Вторник: Урок 3, Урок 4

Среда: Урок 5, Урок 6, Урок 7

Четверг: Урок 8, Урок 9, Урок 10

Пятница: Урок 11, Урок 12, Урок 13

Скрещивание:

Создаем новый вариант расписания С, объединяя уроки из варианта А и В следующим образом:

Понедельник: Урок 1, Урок 2 (из варианта А).

Вторник: Урок 3 (из варианта В), Урок 4 (из варианта А).

Среда: Урок 5 (из варианта В), Урок 6 (из варианта В), Урок 7 (из варианта А).

Четверг: Урок 8 (из варианта В), Урок 9 (из варианта А), Урок 10 (из варианта В).

Пятница: Урок 11 (из варианта В), Урок 12 (из варианта А), Урок 13 (из варианта А).

Для оценки особей можно использовать функцию пригодности, основанную на следующих критериях:

Равномерное распределение учебной нагрузки: Особь получает больше очков, если учебная нагрузка распределена более равномерно.

Учет предпочтений учителей и учеников: Особь получает больше очков, если расписание учитывает предпочтения учителей и учеников.

Удобство для учеников: Особь получает больше очков, если ученикам удобнее перемещаться между классами и занятиями.

Эффективность использования помещений: Особь получает больше очков, если помещения используются более эффективно.

Занятость помещений: Особь получает меньше очков, если некоторые помещения остаются незанятыми.

Пример. Выбор особей для скрещивания.

В этом примере мы выбираем особи для скрещивания следующим образом:

– Выбираем особь А с самой высокой пригодностью.

– Ищем особь В с наивысшей пригодностью среди всех особей, которые не были выбраны для скрещивания ранее.

– Если такая особь найдена, скрещиваем эти две особи.

– Повторяем процесс, начиная с выбора особи А, до тех пор, пока все особи не будут скрещены.

В этом примере мутация происходит следующим образом:

– Выбираем случайный урок в расписании.

– Изменяем время начала урока на случайное значение, которое не конфликтует с другими уроками.

– Если изменение времени начала урока привело к конфликту с другим уроком, возвращаем время начала урока в исходное состояние и выбираем другой урок для мутации.

Пример работы функции пригодности при составлении расписания

В этом примере функция пригодности вычисляет количество очков, которые получает особь, по следующей формуле:

Пригодность = (Равномерность нагрузки \* Учет предпочтений \* Удобство для учеников \* Эффективность использования помещений) - Занятость помещений, где каждый из множителей принимает значение от 0 до 1, а “-” обозначает операцию штрафования.

Для улучшения качества расписания используется функция качества  $f_i =$

$f_i(G_i)$ . В соответствии с СанПиН, критериями качества являются трудоемкость учебного дня, чередование предметов разных предметных областей, место предметов в расписании и предпочтения учителей. За нарушение этих критериев увеличивается значение штрафа, а функция качества стремится к минимуму.

$$f_i = \sum_{j=1}^{\text{кол-огр}} x_j k_j,$$

где  $i$  – номер эпохи (популяции);  $j$  – вариант при скрещивании и мутации;  $x_j = \{0, 1, 2\}$  – признак нарушения, показывающий наличие и степень нарушения в зависимости от чередования предметных областей (0 – практически не влияет на расписание, 1 – умеренно влияет, 2 – сильно влияет);  $k_j$  – коэффициент значимости критерия (как правило, назначается большим для требований СанПиНа и меньшим для предпочтений учителей, диапазон 0-5).

В программе использован коэффициент антикачества. Термин заимствован из диссертационного исследования Сидоровой Л.З.<sup>1</sup>, где она рассматривала качество образования как результат организации безопасной образовательной среды учебного заведения с учетом регулирования опасностей и рисков достижения качества образования (безопасность личности, нормативы требо-

<sup>1</sup> Сидорова Л. З. Проектирование педагогических ситуаций как средство организации безопасной образовательной среды педагогического колледжа: дис. ... канд. пед. наук. Иркутск, 2008. 249 с.

ваний и т.д.). В данном случае в программе для достижения нужных качественных характеристик вводятся штрафы за нарушение вводимых критериев. Изначально коэффициент антикачества вводится в несколько раз ( в десять и более) превышающий средний уровень штрафов, чтобы программа автоматически неоднократно улучшила все качественные характеристики.

Затем выбираются лучшие расписания для следующего поколения на основе их приспособленности.

После завершения работы генетического алгоритма выбирается лучшее расписание из последней популяции и представляется в формате, удобном для использования школьными администраторами.

### Результаты и их обсуждение

Разработанный алгоритм был реализован на языке C#.

Исходные данные для каждого класса заполняются пользователем вручную.

При помощи таблицы ограничения по предметам можно оперативно изменять нагрузку в течение периода обучения.

Программа позволяет ввести начальное количество популяций (от 0 до 7000) и установить искусственный коэффициент антикачества (который должен стремиться к 0 и является начальным значением штрафа). Качество функции  $f_i = \sum_{j=1}^{\text{кол-огр}} x_j k_j$  зависит от

этого коэффициента. Если установить большое количество популяций, то не всегда можно улучшить расписание, и это занимает много времени (иногда десятки минут), что отражено на графике.

При тестировании на двухъядерном компьютере удалось получить оптимальное расписание на популяциях  $100 \div 3000$  и коэффициенте антикачества 600. Показателем качества расписания служит максимальное значение функции качества  $f_i = f(G_i)$ , при минимальном значении штрафа функции качества  $f_i = \sum_{j=1}^{\text{кол-огр}} x_j k_j$ . Для наглядного изображения, это такое расположение всех предметов в расписании, когда у учителей учащихся нет окон, когда у младших классов нет пяти уроков в день, когда трудные предметы чередуются с легкими и трудные предметы в расписании через день, и т.д.

По построенному графику на рис.2 видно, что график с использованием ГА имеет максимальное качества не при самых больших значениях популяций и коэффициента антикачества. А также изображено, что количество шагов с использованием ГА значительно меньше, чем при полном переборе.

Если встретятся неудобные комбинации, например пустой урок, рекомендуется изменить их вручную или сгенерировать новые.

На рис. 3 показан вид окна в процессе вычисления расписания.

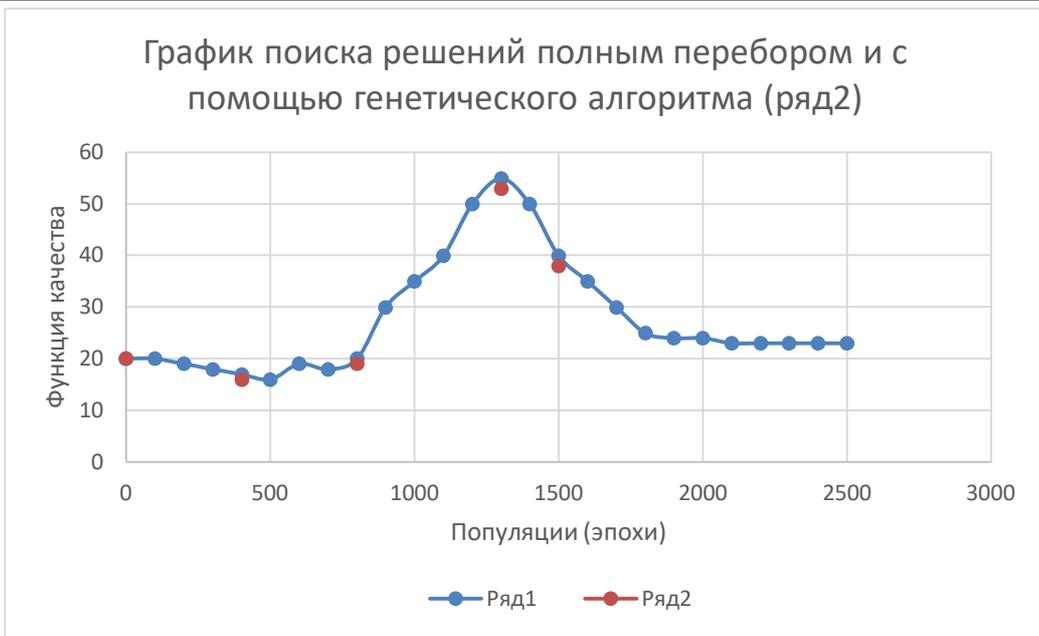


Рис. 2. Графики поиска решения

Fig. 2. Graph of the solution search using

Расписание

Объем популяции: 600

Решение Показатель антикачества: 15,000 Сохранить результат в файл

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Рядг. о нзм.	Рядг. о нзм.	Рядг. о нзм.	Рядг. о нзм.	Рядг. о нзм.						
Ф-ра	музыка 13	Актн 17	Ф-ра	Ф-ра	ИВТ 24	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
ИЗО 4	литер 2	Ф-ра	Ф-ра	Актн 17	литер 19	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
русс 4	магем 2	русс 5	ОПКС 21	магем 15	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
Д.П. 4	русс 2	магем 5	магем 3	русс 20	магем 14	русс 19	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
					Актн 17	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
					Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
литер 4	магем 2	литер 5	музыка 13	ИЗО 25	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
магем 4	Актн 17	род.язк 5	Ф-ра	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
русс 4	русс 2	окр.мр 5	Актн 17	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
Ф-ра	литер 2	магем 5	ИЗО 3	ОБЖ 12	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
Д.П. 4			русс 3	русс 20	магем 14	Актн 17	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
			род.язк 3	магем 15	литер 19	магем 14	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
			магем 3	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
литер 4	русс 2	литер 5	литер 3	Актн 17	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
музыка 13	окр.мр 2	музыка 13	окр.мр 3	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
русс 4	литер 2	магем 5	Актн 17	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
Д.П. 4	Ф-ра	русс 5	магем 3	ОБЖ 12	музыка 13	русс 19	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
магем 4	магем 2	Ф-ра	русс 3	магем 15	Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
окр.мр 4				ИВТ 24	Актн 17	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
				ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
литер 4	Ф-ра	литер 5	русс 3	музыка 13	ОБЖ 12	род.яз./лит 19	магем 15	Актн 17	ИВТ 24	ИВТ 24
русс 4	Ф-ра	лит.мр.к 5	магем 3	Актн 17	магем 14	литер 19	русс 20	магем 15	ОБЖ 12	ИВТ 24
Ф-ра	литер 2	окр.мр 5	окр.мр 3	литер 20	литер 19	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
магем 4	Актн 17	русс 5	лит.мр.к 3	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
Д.П. 4	магем 2	Ф-ра	русс 20	Актн 17	русс 19	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
русс 4	магем 2	магем 5	магем 3	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
окр.мр 4	Ф-ра		Ф-ра	магем 14	русс 19	ИВТ 24	русс 20	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24
литер 4				Ф-ра	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24	ИВТ 24

Рис. 3. Вид окна в процессе создания расписания

Fig. 3. View of the window in the process of calculating the schedule

## Выводы

Разработанный алгоритм с последующей программной реализацией обладает следующими достоинствами:

- быстрое освоение пользователем без специальной подготовки;
- основная работа направлена только на ввод начальных данных;

– расписание легко корректируется в ручном режиме и возможна совместная удаленная работа при наборе данных;

– программу можно модернизировать, например, для случая увеличения школы;

– программа будет работать с неполным набором данных;

– программа легко адаптируется к зарубежным учебным учреждениям.

## Список литературы

1. Староверова Н. А., Шустрова М. Л. Искусственный интеллект в профессиональной сфере. Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Ред.-издательский центр "Школа", 2022. 84 с.

2. Буйневич И.А., Криушина Ю.А., Халин Ю.А., Катыхин А.И., Криушин Е.А. Метод построения нечеткой когнитивной карты конкурентоспособности машиностроительного предприятия. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2023;13(3):146-163. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>.

3. Основы нейрокибернетики, генетические алгоритмы. Тула: ТулГУ, 2014. 103 с. EDN XTAFDV.

4. Курейчик В. М., Гладков Л. А., Курейчик В. В. Эволюционное моделирование и генетические алгоритмы. Методы поиска оптимальных решений на основе инспирированных природой систем. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2011. 260 с. EDN GZYNBJ.

5. Лисицин Л. А., Халин Ю. А., Лисицин А. Л. Системы поддержки принятия управленческих решений в условиях неполной информации // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 4-2 (43). С. 95-99.

6. Bioethics, Artificial Intelligence and Medical Diagnostics / A. G. Chuchalin, V. Yu. Mishlanov, Ya. V. Mishlanov [et al.]. Perm: Academician Ye.A. Vagner Perm State Medical University, 2019. EDN SYBNMU.

7. Сурова Н. Ю., Косов М. Е. Искусственный интеллект. М.: ООО "Издательство "Юнити-Дана", 2021. 408 с. EDN QZEMDW.

8. Остроух А. В. Введение в искусственный интеллект. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 250 с. DOI 10.12731/978-5-907208-26-1. EDN KTJGZM.

9. Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения / Ю.А. Халин, А.И. Катыхин, С.А. Зинкин, А.А. Шилин // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022;26(4):117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.

10. Танаев В.С., Шкурба В.В. Введение в теорию расписаний (Экономико-математическая библиотека). М.: Наука, 1975. 256 с.
11. Могилев А. А. Обзор методов решения задач теории расписаний // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование: 2019. №4(37). URL: [ivtio.ru/37.htm](http://ivtio.ru/37.htm).
12. Биоэтика, искусственный интеллект и медицинская диагностика : Посвящается 150-летию открытия Периодического закона химических элементов / А. Г. Чучалин, В. А. Черешнев, В. Ю. Мишланов [и др.]. Пермь : Пермский гос. мед. университет имени академика Е.А. Вагнера, 2019. 208 с. EDN ZDMXHV.
13. Цифровая трансформация и искусственный интеллект в разработке биологически активных веществ и лекарственных форм / Л. В. Погребняк, Е. А. Кульгав, Е. В. Ковтун, А. В. Погребняк. М.: ООО «Издательство «Мир науки», 2022. 201 с. EDN LWVFJC.
14. Антонова В.М., Старцев Е.А., Юрин О.В. Использование DIALOGFLOW в расписании студентов // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2021. Т. 10. № 4. С. 4-8.
15. Буланов Р.В., Долженко А.И. Микросервисная архитектура подсистемы "Расписание занятий ргэу (ринх)" // Информатизация в цифровой экономике. 2020. Т. 1. № 4. С. 141-152.
16. Гармаева Д.А., Казимиров А.С., Попова В.А. Создание информационной системы для представления расписания занятий высшего учебного учреждения // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. Т. 11. № 1. С. 21-28.
17. Голяков С.М., Шилова А.Ю., Шилов Ю.М. Применение теории расписаний для организации учебного процесса общеобразовательных учреждениях // Сборник статей XXV Международной научно-практической конференции «Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее». Пенза. Изд-во: Наука и Просвещение, 2019. Ч. 1. С. 42-44.

## References

1. Staroverova N. A., Shustrova M. L. *Iskusstvennyi intellekt v professional'noi sfere* [Artificial intelligence in the professional sphere]. Kazan', 2022. 84 p. EDN PTSPTI.
2. Buinevich I.A., Kriushina Y.A., Khalin Y.A., Katykhin A.I., Kriushin E.A. Method of Construction of a Fuzzy Cognitive Map of the Competitiveness of a Machine-Building Enterprise. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(3):146-163. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>
3. *Osnovy neirokibernetiki, geneticheskie algoritmy* [Fundamentals of neurocybernetics, genetic algorithms. Tula, TulSU Publ., 2014. 103 p. EDN XTAFDV.

4. Kureychik V. M., Gladkov L. A., Kureychik V. V. *Evolyutsionnoe modelirovanie i geneticheskie algoritmy. Metody poiska optimal'nykh reshenii na osnove inspirirovannykh prirodoi sistem* [Evolutionary modeling and genetic algorithms. Methods of searching for optimal solutions based on nature-inspired systems]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Publ., 2011, 260 p. EDN GZYNBJ.

5. Lisitsin L. A., Khalin Yu. A., Lisitsin A. L. *Sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh reshenii v usloviyakh nepolnoi informatsii* [Management decision support systems in conditions of incomplete information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 95-99.

6. Chuchalin A. G., Mishlanov V. Yu., Mishlanov Ya. V. [et al.] *Bioethics, Artificial Intelligence and Medical Diagnostics*. Perm, Academician Ye.A. Vagner Perm State Medical University Publ., 2019. EDN SYBNMU.

7. Surova N. Y., Kosov M. E. *Iskusstvennyi intellekt* [Artificial intelligence]. Moscow, Unity-Dana Publ., LLC, 2021, 408 p. EDN QZEMDW.

8. Ostroukh A.V. *Vvedenie v iskusstvennyi intellekt* [Introduction to artificial intelligence]. Krasnoyarsk, 2020. 250 p. DOI 10.12731/978-5-907208-26-1. EDN KTJGZM.

9. Khalin Y.A., Katykhin A.I., Zinkin S.A., Shilin A.A. *Cognitive Modeling of Information Support for Game-Based Automated Learning*. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022;26(4):117-131 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.

10. Tanaev V.S., Shkurba V.V. *Vvedenie v teoriyu raspisaniy (Ekonomiko-matematicheskaya biblioteka)* [Introduction to the theory of schedules (Economic and Mathematical library)]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 256 p.

11. Mogilev A. A. *Obzor metodov resheniya zadach teorii raspisaniy «Yuzhnyi federal'nyi universitet»* [Review of methods for solving problems of the theory of schedules "Southern Federal University"]. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie = Computer Science, Computer engineering and engineering education*, 2019, no.4(37). Available at: [ivtio.ru/37.htm](http://ivtio.ru/37.htm).

12. Chuchalin A. G., Chereshnev V. A., Mishlanov V. Yu. [et al.]. *Bioetika, iskusstvennyi intellekt i meditsinskaya diagnostika: Posvyashchaetsya 150-letiyu otkrytiya Periodicheskogo zakona khimicheskikh elementov* [Bioethics, artificial intelligence and medical diagnostics: Dedicated to the 150th anniversary of the discovery of the Periodic Law of Chemical Elements]. Perm, Perm State Medical University. Academician E.A. Wagner University Publ., 2019. 208 p. EDN ZDMXHV.

13. Pogrebnyak L. V., Kulgav E. A., Kovtun E. V., Pogrebnyak A.V. *Tsifrovaya transformatsiya i iskusstvennyi intellekt v razrabotke biologicheskii aktivnykh veshchestv i lekarstvennykh form* [Digital transformation and artificial intelligence in the development of

biologically active substances and dosage forms]. Moscow, Mir Nauki Publ., LLC, 2022, 201 p. EDN LWVFJC.

14. Antonova V.M., Startsev E.A., Yurin O.V. Ispol'zovanie DIALOGFLOW v raspisaniy studentov [The use of DIALOGFLOW in the schedule of students]. *Metodicheskie voprosy prepodavaniya infokommunikatsii v vysshei shkole = Methodological issues of teaching infocommunications in higher education*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 4-8.

15. Bulanov R.V., Dolzhenko A.I. Mikroservisnaya arkhitektura podsistemy "Raspisanie zanyatii rgeu (rinkh)" [Microservice architecture of the subsystem "Schedule of classes of RSEU (rinh)"]. *Informatizatsiya v tsifrovoi ekonomike = Informatization in the digital economy*, 2020, vol. 1, no. 4, pp. 141-152.

16. Garmaeva D.A., Kazimirov A.S., Popova V.A. Sozdanie informatsionnoi sistemy dlya predstavleniya raspisaniya zanyatii vysshego uchebnogo uchrezhdeniya [Creation of an information system for presenting the schedule of classes of a higher educational institution]. *Molodezhnyi vestnik IrGTU = Youth Bulletin of IrSTU*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 21-28.

17. Golyakov S.M., Shilova A.Yu., Shilov Yu.M. [Application of the theory of schedules for the organization of the educational process]. *Sbornik statei XXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie: sokhranyaya proshloe, sozdaem budushchee»* [Collection of articles of the XXV International scientific and practical conference "Science and education: preserving the past, creating the future"]. Penza, 2019. Part 1, pp. 42-44.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Лисицин Леонид Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программная инженерия», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: leo\_263@mail.ru

**Leonid A. Lisitsin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: leo\_263@mail.ru

**Лисицин Александр Леонидович**, старший преподаватель кафедры информационной безопасности, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vip.lisicin@mail.ru

**Alexander L. Lisitsin**, Senior Lecturer, Information Security Department, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vip.lisicin@mail.ru

**Лисицин Алексей Леонидович**, аспирант кафедры «Программная инженерия», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alex25lisitsyn@gmail.com

**Alexey L. Lisitsin**, Post-Graduate Student, Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alex25lisitsyn@gmail.com

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-163-179>

## Визуальное программирование метода отношения площадей

М.В. Бобырь<sup>1</sup> ✉, Н.И. Храпова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

## Резюме

**Цель исследования.** Исследование зависимости между входными и выходными характеристиками нечетко-логической системы на основе применения метода отношения площадей. Для описания указанного метода и полученных во время моделирования в табличном процессоре результатов предлагается использование средств иллюстративного представления информации – визуальное программирование.

**Методы.** Для изучения метода отношения площадей рассматривалась нечетко-логическая модель, содержащая две входные переменные с тремя треугольными функциями принадлежности и одну выходную переменную с пятью треугольными функциями принадлежности. Была сформирована база нечетких правил. Для определения степеней активации выходных термов применялось минимаксное правило вывода Л. Заде. Дефаззификация значений проводилась с использованием модели, в основе которой лежит метод отношения площадей.

**Результаты.** Рассмотрены преимущества метода отношения площадей перед традиционными моделями, которые заключаются в возможности компенсировать главный недостаток – сужение интервала дефаззификации. С помощью предлагаемого метода изучена возможность использования различных количеств переменных на входных и выходных функциях принадлежности. Результаты экспериментальных исследований показали, что комбинирование параметров позволяет создать визуальное представление характеристик между входными и выходными переменными.

**Заключение.** В данной статье описан метод отношения площадей, который позволяет визуализировать зависимость между входными и выходными переменными. Приведены основные результаты численного моделирования, отражающие специфику исследуемого метода. Изучение проводилось посредством визуального программирования, которое обеспечивает ряд преимуществ, таких как повышение качества программного продукта, обеспечение четкой структуризации задачи и доступность для восприятия человека.

**Ключевые слова:** нечеткая логика; сужение интервала дефаззификации; метод отношения площадей; визуальное программирование; табличный процессор.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

**Для цитирования** Бобырь М.В., Храпова Н.И. Визуальное программирование метода отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 163-179. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-163-179>.

Поступила в редакцию 14.01.2024

Подписана в печать 06.02.2024

Опубликована 27.03.2024

© Бобырь М.В., Храпова Н.И., 2024

## Visual Programming of the Area Ratio Method

Maksim V. Bobyr<sup>1</sup> ✉, Natalia I. Khrapova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: maxboby@gmail.com

### Abstract

**Purpose of research.** Investigation of the relationship between the input and output characteristics of a fuzzy logic system based on the application of the area ratio method. The description of the specified method and the results obtained during modeling in a tabular processor is carried out using the means of illustrative presentation of information – visual programming.

**Methods.** To study the area ratio method, we considered a fuzzy logic model containing two input variables with three triangular membership functions and one output variable with five triangular membership functions. A database of fuzzy rules has been formed. The degrees of activation of the output terms were determined using the minimax rule of output L. Zadeh. The defuzzification of the values was carried out using a model based on the area ratio method.

**Results.** There are advantages of the area ratio method over traditional models, which consist in the ability to compensate for the main disadvantage - narrowing the defuzzification interval. Using the proposed method, the possibility of using different numbers of variables on the input and output membership functions is studied. The results of experimental studies have shown that combining the parameters allows us to create a visual representation of the characteristics between the input and output variables.

**Conclusion.** This article describes the area ratio method, which allows us to visualize the relationship between input and output variables. There are the main results of numerical modeling reflecting the specifics of the method. The study was conducted through visual programming, which provides a number of advantages, such as improving the quality of the software product, ensuring a clear structuring of the task and accessibility to human perception.

**Keywords:** fuzzy logic; narrowing of the defuzzification interval; area ratio method; visual programming; table processor.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding.** The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00071 "Development of a computer vision model for intelligent navigation of robotic systems based on the construction of three-dimensional scenes based on depth maps".

**For citation:** Bobyr M. V., Khrapova N. I.. Visual Programming of the Area Ratio Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 163-179 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-163-179>.

Received 14.01.2024

Accepted 06.02.2024

Published 27.03.2024

\*\*\*

### Введение

В настоящее время значение нечеткой логики продолжает расти во всех

сферах [1-3]. Широкое распространение получили алгоритмы нечетко-логического вывода, названные в честь их создателей Tsukamoto, Sugeno, Larsen [4-7]. Важ-

нейшее место в нечеткой логике занимает также алгоритм Mamdani. В основе методики данного алгоритма лежит отображение входных сигналов в выходной, которое обеспечивает наиболее точное приближение к реальной системе.

Нечеткая модель Mamdani лежит в основе большого количества систем: в статье [8] разработана система автоматического контроля влажности природного газа, в статье [9] представлена система управления освещением парковой зоны, в статье [10] рассматривается задача подбора персонала в организациях.

Несмотря на широкое применение алгоритма Mamdani, он имеет ряд несовершенств, таких как снижение чувствительности или нечувствительность, разрывность метода дефаззификации [11]. Главным недостатком является сужение интервала дефаззификации, которое заключается в невозможности получения крайних (min или max) значений выходной переменной на выходе нечеткой модели [12,13]. Компенсировать эту погрешность позволяет использование метода отношения площадей [14-15].

Метод отношения площадей основывается на нахождении площадей треугольных или трапециевидных функций принадлежности с помощью обобщенной формулы:

$$S = \frac{h}{6} (d_1 + 4d_2 + d_3), \quad (1)$$

при  $h$  – высота рассматриваемой фигуры;  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  – длины нижнего, среднего и верхнего оснований фигуры.

Для описания метода отношения площадей использовались средства визуального программирования [16]. Визуальное программирование – процесс образного описания рассматриваемого алгоритма с использованием традиционного набора графических элементов. В настоящее время роль рассматриваемого метода иллюстративного представления информации значительно возрастает, так как он имеет ряд преимуществ: совершенствование программного продукта благодаря снижению количества ошибок при разработке программы, четкое отражение структуры решаемой задачи, а также доступность восприятия человеком.

## Материалы и методы

Преимуществом метода отношения площадей является возможность компенсировать ошибку при сужении интервала дефаззификации, что приводит к увеличению производительности и быстродействия любой нечеткой системы [17].

Рассмотрим представление данного метода в среде табличного процессора.

### 1. Формирование исходных данных.

В среде табличного процессора для входных переменных  $A_1$ - $A_3$  и  $B_1$ - $B_3$  и выходных переменных  $C_1$ - $C_5$  задаются исходные значения термов.

Для графического отображения функций принадлежности генерируются массивы возможных значений входных и выходных переменных по формулам (2) и (3). В разделе «результаты и их обсуждение» на рис. 2 представлены

фрагменты полученных массивов во время экспериментальных расчетов. В ячейках A20:A60 приведен диапазон суппорта первой входной переменной. Ячейки B20:B60 содержат диапазон всех возможных значений функции принадлежности первой входной переменной  $\mu(A_1)$ . Для второй  $\mu(A_2)$  и третьей  $\mu(A_3)$  функций принадлежности диапазон формируется в ячейках C20:C60 и D20:D60 соответственно. В ячейках G20:I60 приведен диапазон возможных значений для функций принадлежности второй входной переменной  $\mu(B_1-B_3)$ . Ячейки L20:P116 содержат диапазон возможных значений для функций принадлежности выходной переменной  $\mu(C_1-C_5)$  (рис.2).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & \text{если } x > a_1 \ \& \ x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & \text{если } x > a_2 \ \& \ x \leq a_3 \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

В табличном процессоре формула (2) имеет вид

$$\begin{aligned} &=ЕСЛИ(И(A20>=A\$3;A20<=B\$3); \\ &(A20-A\$3)/(B\$3-A\$3); \\ &ЕСЛИ(И(A20>B\$3;A20<C\$3); \\ &(C\$3-A20)/(C\$3-B\$3);0)), \end{aligned} \quad (3)$$

где ЕСЛИ (И) – проверка условий; \$ – абсолютная ссылка, предназначенная для закрепления адреса ячейки при переносе формулы, т.е. при автоматическом заполнении адрес ячейки не меняется.

С помощью значений входных термов и полученных массивов строятся

графики функций принадлежности [18] (рис. 3).

2. Вычисление суммарной площади выходной функции принадлежности происходит по формуле

$$S_1 = n \times \frac{d_1}{2}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество термов выходной функции принадлежности;  $d_1$  – длина нижнего основания, которая рассчитывается по формуле  $d_1 = a_3 - a_1$ , т.к. значение переменной  $a_1$  в табличном процессоре находится в ячейке I3, а значение  $a_3$  в ячейке K3, то формула (4) будет иметь вид (табл.1):

$$=K3-I3. \quad (5)$$

В табличном процессоре формула для определения суммарной площади выходной функции принадлежности (4) принимает вид (табл.1):

$$=N2*N3/2=(K3-I3) * N3/2. \quad (6)$$

Система СИ предполагает, что ответ задается трехзначными числами, поэтому в формуле (6) реализована функция округления до 2 знака:

$$=ОКРУГЛ(N2*N3/2;2). \quad (7)$$

3. Расчет степеней принадлежности для входных термов происходит с помощью заданных значений для входных переменных, по которым далее производится поиск в массивах возможных состояний  $\mu(A_1-A_3)$  и  $\mu(B_1-B_3)$ . Числовые значения, соответствующие искомым переменным  $a_1-a_3$  и  $b_1-b_3$ , автоматически заносятся в таблицу (рис. 5).

Формула для расчета принимает следующий вид:

$$=ОКРУГЛ(ВПР(Q2;\$A\$20:\$D\$60;2;0);3), (8)$$

где ВПР – функция для поиска данных в выбранном диапазоне; Q2 – искомое значение; A\$20:D\$60 – диапазон поиска; 2 – столбец в диапазоне, в котором необходимо провести поиск.

4. Определение степеней активации выходных термов с использованием минимаксного правила вывода Заде [19] осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} \mu(C_1) &= \min(a_1; b_1); \\ \mu(C_2) &= \max(\min(a_1; b_2); \min(a_2; b_1)); \\ \mu(C_3) &= \max(\min(a_1; b_3); \min(a_2; b_2); \min(a_3; b_1)); \\ \mu(C_4) &= \max(\min(a_2; b_3); \min(a_3; b_2)); \\ \mu(C_5) &= \min(a_3; b_3). \end{aligned} \quad (9)$$

Данные формулы (9) в табличном процессоре принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} &=МИН(Q3;S3); \\ &=МАКС(МИН(Q3;S4);МИН(Q4;S3)); \\ &=МАКС(МИН(Q3;S5);МИН(Q4;S4); \\ &МИН(Q5;S3)); \\ &=МАКС(МИН(Q4;S5);МИН(Q5;S4)); \\ &=МИН(Q5;S5). \end{aligned} \quad (10)$$

5. Присвоение числовых значений переменным высот степеней принадлежности выходных термов осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} h_1 &:= \mu(C_1); h_2 := \mu(C_2); h_3 := \mu(C_3); \\ h_4 &:= \mu(C_4); h_5 := \mu(C_5). \end{aligned} \quad (11)$$

Далее происходит построение массива возможных значений для функций принадлежности после агрегации (рис. 8). Данный массив имеет диапазон суппорта выходной переменной от 0 до 96. Заполнение ячеек массива происходит по формуле

$$=МИН(L20;\$AI\$3), \quad (12)$$

где первое значение в скобках соответствует аналогичной ячейке из массива возможных значений выходной функции принадлежности до агрегации, а второе значение соответствует величинам степеней активации выходных термов  $\mu(C_1)$ -  $\mu(C_5)$ .

Длины верхних оснований определяются с помощью построенного массива в табличном процессоре по формуле

$$=ЕСЛИ(AI3=0;0; СЧЁТЕСЛИ(S20:S116;AI3)), \quad (13)$$

где ЕСЛИ – функция для логического сравнения значений и ожидаемых результатов; СЧЁТЕСЛИ – функция для подсчета количества ячеек, отвечающих определенному условию; AI3 – ячейка с результатом вычисления высот степеней принадлежности; S20:S116 – диапазон ячеек массива.

При значениях ячеек  $h_1$ - $h_5$  равных «0», длина верхнего основания также приравнивается нулю. Если значение ячейки  $h_1$ - $h_5$  отлично от нуля, то в массиве происходит подсчет количества ячеек с этим значением.

6. Расчет площадей преобразованных функций принадлежности выходной переменной происходит по формуле (табл.1)

$$S_n = \begin{cases} S_n = 0, & h = 0 \\ S_n = \frac{d_1}{2}, & h = 1 \\ S_n = \frac{h}{2}(d_1 + d_3), & h \in (0;1). \end{cases} \quad (14)$$

Формула (14) в табличном процессоре имеет вид

$$=ОКРУГЛ(AN6*(AN2-AN4)/2;2). \quad (15)$$

7. Вычисление суммы площадей преобразованных функций принадлежности происходит по формуле (табл.1)

$$S_{общ} = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (16)$$

Приведенная выше формула (16) в табличном процессоре принимает вид

$$=СУММ(AN8:AR8), \quad (17)$$

где СУММ – функция для суммирования значений, находящихся в диапазоне ячеек.

8. Расчет отношения суммы площадей преобразованных функций принадлежности к площади усеченных функ-

ций принадлежности происходит по формуле (табл.1)

$$D = \frac{S_{общ}}{S_1}. \quad (18)$$

В табличном процессоре формула (18) принимает следующий вид

$$=ОКРУГЛ(AT8/N1;2). \quad (19)$$

9. Дефаззификация полученного значения происходит по формуле

$$y_{defuz} = \left[ D * (e_3 - a_1) \right] + a_1. \quad (20)$$

В табличном процессоре формула (20) имеет вид

$$=(AV2*(K15-I3))+I3. \quad (21)$$

Основные формулы, используемые в методе отношения площадей, сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные формулы

**Table 1.** The basic formulas

Формула MAP / MAR Formula	Табличный процессор / Table Processor		Скрин / Screen
	Ячейка с ответом / The cell with the answer	Формула / Formula	
$S_1 = n \frac{d_1}{2}$	N1	= N2*N3/2=(C3-A3) * N3/2	Рис.4
$d_1$	N2	=C3-A3	
$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & \text{если } x > a_1 \text{ \& } x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & \text{если } x > a_2 \text{ \& } x \leq a_3 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$	B20:B60	=ЕСЛИ(И(A20>=\$A\$3;A20<=\$B\$3);(A20-\$A\$3)/(\$B\$3-\$A\$3);ЕСЛИ(И(A20>\$B\$3;A20<\$C\$3);(\$C\$3-A20)/(\$C\$3-\$B\$3);0))	Рис.2
$a_1-a_3$	Q3:Q5	=ВПР(Q2;\$A\$20:\$D\$60;2;0)	Рис.5
$b_1-b_3$	S3:S5	= ВПР(S2;\$F\$20:\$I\$60;2;0)	
$d_1$	AN2:AR2	= \$K\$3-\$I\$3	Рис.10
$d_{31}-d_{35}$	AN4	=ЕСЛИ(AI3=0;0;СЧЁТЕСЛИ(S20:S116;AI3))	

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Формула MAP / MAR Formula	Табличный процессор / Table Processor		Скрин / Screen
	Ячейка с ответом / The cell with the answer	Формула / Formula	
$h_1$	AN6	:=AL3	Рис.11
$S_n = \begin{cases} S_n = 0, & h = 0 \\ S_n = \frac{d_1}{2}, & h = 1 \\ S_n = \frac{h}{2}(d_1 + d_3), & h \in (0;1) \end{cases}$	AN8:AR8	=AN6*(AN2-AN4)/2	
$S_{общ} = \sum_{i=1}^n S_i$	AT8	=СУММ(AN8:AR8)	
$D = \frac{S_{общ}}{S_1}$	AV2	=AT8/N1	
$y_{defuz} = [D*(e_3 - a_1)] + a_1$	AV5	=(AV2*(K15-I3))+I3	

**Результаты и их обсуждение**

Рассмотрим численный пример описания метода отношения площадей.

1. Формирование исходных данных.

В среде табличного процессора были заданы исходные значения термов для

входных переменных A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> и B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub>. Предположим, что для A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> термы принимают следующие значения: a<sub>1</sub>=15, a<sub>2</sub>=25, a<sub>3</sub>=35, b<sub>1</sub>=25, b<sub>2</sub>=35, b<sub>3</sub>=45, c<sub>1</sub>=35, c<sub>2</sub>=45, c<sub>3</sub>=55. Для B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub>: a<sub>1</sub>=15, a<sub>2</sub>=25, a<sub>3</sub>=35, b<sub>1</sub>=25, b<sub>2</sub>=35, b<sub>3</sub>=45, c<sub>1</sub>=35, c<sub>2</sub>=45, c<sub>3</sub>=55 (рис.1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1		<b>A1</b>				<b>B1</b>				<b>C1</b>		
2	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	
3	15	25	35		15	25	35		0	16	32	
4		<b>A2</b>				<b>B2</b>				<b>C2</b>		
5	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	
6	25	35	45		25	35	45		16	32	48	
7		<b>A3</b>				<b>B3</b>				<b>C3</b>		
8	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>		c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>		c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	
9	35	45	55		35	45	55		32	48	64	
10										<b>C4</b>		
11									d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	
12									48	64	80	
13										<b>C5</b>		
14									e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	
15									64	80	96	

**Рис. 1.** Исходные значения термов для входных переменных A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> и B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub> и выходных переменных C<sub>1</sub>-C<sub>5</sub>

**Fig. 1.** The initial term values for input variables A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> and B<sub>1</sub>-B<sub>3</sub> and output variables C<sub>1</sub>-C<sub>5</sub>

Присвоим исходные значения термов для выходных переменных  $C_1-C_5$ . Пусть  $a_1=0, a_2=16, a_3=32, b_1=16, b_2=32, b_3=48, c_1=32, c_2=48, c_3=64, d_1=48, d_2=64, d_3=80, e_1=64, e_2=80, e_3=96$  (см. рис.1).

Для построения графиков функций принадлежности сформируем массив возможных значений входных переменных  $\mu(A_1-A_3)$  и  $\mu(B_1-B_3)$  и выходных  $\mu(C_1-C_5)$  по формуле (3). Для входных переменных данный массив имеет диапазон суппорта от 15 до 55, для выходных – от 0 до 96 (рис. 2).

Полученные во время экспериментальных исследований графики функций принадлежности изображены на рис. 3.

2. Для вычисления суммарной площади выходной функции принадлежности

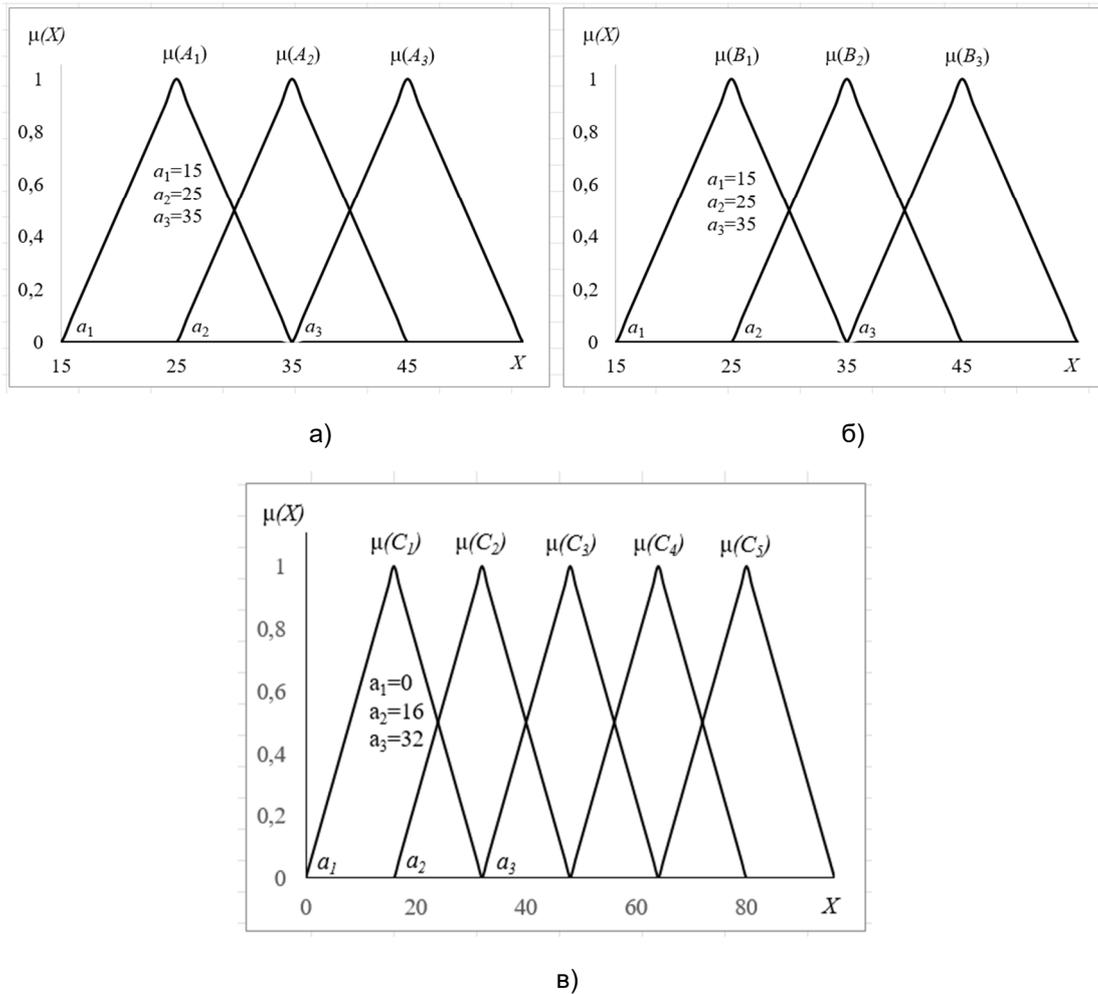
определим некоторые значения переменных. Количество термов выходной функции принадлежности  $n=5$ . Длина нижнего основания (формула (5)) принимает значение  $d1 = a3 - a1=32-0=32$ . Следовательно, площадь рассчитываемой функции принадлежности (формула (7)) равна  $S1=(K3-I3) * N3/2=(32-0)*5/2=80$  (рис.4).

3. Расчет степеней принадлежности для входных термов (формула (8)). В качестве примера входные переменные принимают следующие значения:  $A=26, B=41$ . В массивах возможных состояний  $\mu(A_1-A_3)$  и  $\mu(B_1-B_3)$  (см. рис.2) происходит поиск введенных значений «26» и «41» соответственно. Вследствие поиска были получены данные:  $a_1=0,9; a_2=0,1; a_3=0; b_1=0; b_2=0,4; b_3=0,6$  (рис.5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
19		$\mu(A_1)$	$\mu(A_2)$	$\mu(A_3)$			$\mu(B_1)$	$\mu(B_2)$	$\mu(B_3)$			$\mu(C_1)$	$\mu(C_2)$	$\mu(C_3)$	$\mu(C_4)$	$\mu(C_5)$
20	15	0	0	0		15	0	0	0		0	0	0	0	0	0
21	16	0,1	0	0		16	0,1	0	0		1	0,0625	0	0	0	0
22	17	0,2	0	0		17	0,2	0	0		2	0,125	0	0	0	0
23	18	0,3	0	0		18	0,3	0	0		3	0,1875	0	0	0	0
24	19	0,4	0	0		19	0,4	0	0		4	0,25	0	0	0	0
25	20	0,5	0	0		20	0,5	0	0		5	0,3125	0	0	0	0
26	21	0,6	0	0		21	0,6	0	0		6	0,375	0	0	0	0
27	22	0,7	0	0		22	0,7	0	0		7	0,4375	0	0	0	0
28	23	0,8	0	0		23	0,8	0	0		8	0,5	0	0	0	0
29	24	0,9	0	0		24	0,9	0	0		9	0,5625	0	0	0	0
30	25	1	0	0		25	1	0	0		10	0,625	0	0	0	0
31	26	0,9	0,1	0		26	0,9	0,1	0		11	0,6875	0	0	0	0
32	27	0,8	0,2	0		27	0,8	0,2	0		12	0,75	0	0	0	0
33	28	0,7	0,3	0		28	0,7	0,3	0		13	0,8125	0	0	0	0
34	29	0,6	0,4	0		29	0,6	0,4	0		14	0,875	0	0	0	0
35	30	0,5	0,5	0		30	0,5	0,5	0		15	0,9375	0	0	0	0
36	31	0,4	0,6	0		31	0,4	0,6	0		16	1	0	0	0	0
37	32	0,3	0,7	0		32	0,3	0,7	0		17	0,9375	0,0625	0	0	0
38	33	0,2	0,8	0		33	0,2	0,8	0		18	0,875	0,125	0	0	0
39	34	0,1	0,9	0		34	0,1	0,9	0		19	0,8125	0,1875	0	0	0
40	35	0	1	0		35	0	1	0		20	0,75	0,25	0	0	0

Рис. 2. Фрагмент массивов возможных значений входных переменных  $A_1-A_3$  и  $B_1-B_3$  и выходных переменных  $C_1-C_5$

Fig. 2. The fragment of possible values' arrays of input variables  $A_1-A_3$  and  $B_1-B_3$  and output variables  $C_1-C_5$



**Рис. 3.** Графики функций принадлежности: **а** – для переменных  $A_1$ - $A_3$ ; **б** – для переменных  $B_1$ - $B_3$ ; **в** – для переменных  $C_1$ - $C_5$

**Fig. 3.** The graphs of membership functions: **a** – for variables  $A_1$ - $A_3$ ; **б** – for variables  $B_1$ - $B_3$ ; **в** – for variables  $C_1$ - $C_5$

	M	N
1	$S_1$	80
2	$d_1$	32
3	$n$	5

**Рис. 4.** Вычисление суммарной площади выходной функции принадлежности в табличном процессоре

**Fig. 4.** The calculation of the total area of the output membership function in a tabular processor

	P	Q	R	S
1		$A$		$B$
2		26		41
3	$a_1$	0,9	$b_1$	0
4	$a_2$	0,1	$b_2$	0,4
5	$a_3$	0	$b_3$	0,6

**Рис. 5.** Расчет степеней принадлежности для входных термов

**Fig. 5.** The calculation of membership degrees for the input terms

4. Определение степеней активации выходных термов (формула (10)) про-

исходит с использованием минимаксного правила вывода Заде (рис.6):

$$\begin{aligned} \mu(C_1) &= \text{МИН}(Q3; S3) = \text{МИН}(0,9; 0) = 0; \\ \mu(C_2) &= \text{МАКС}(\text{МИН}(Q3; S4); \text{МИН}(Q4; S3)) = \\ &= \text{МАКС}(\text{МИН}(0,9; 0,4); \text{МИН}(0,9; 0)) = 0,4; \\ \mu(C_3) &= \text{МАКС}(\text{МИН}(Q3; S5); \text{МИН}(Q4; S4); \text{МИН}(Q5; S3)) = \\ &= \text{МАКС}(\text{МИН}(0,9; 0,6); \text{МИН}(0,1; 0,4); \text{МИН}(0; 0)) = 0,6; \\ \mu(C_4) &= \text{МАКС}(\text{МИН}(Q4; S5); \text{МИН}(Q5; S4)) = \\ &= \text{МАКС}(\text{МИН}(0,1; 0,6); \text{МИН}(0; 0,4)) = 0,1; \\ \mu(C_5) &= \text{МИН}(Q5; S5) = \text{МИН}(0; 0,6) = 0. \end{aligned}$$

	АН	AI
1		
2		
3	$\mu(C_1) = \min(a_1; b_1)$	0
4	$\mu(C_2) = \max(\min(a_1; b_2); \min(a_2; b_1))$	0,4
5	$\mu(C_3) = \max(\min(a_1; b_3); \min(a_2; b_2); \min(a_3; b_1))$	0,6
6	$\mu(C_4) = \max(\min(a_2; b_3); \min(a_3; b_2))$	0,1
7	$\mu(C_5) = \min(a_3; b_3)$	0

**Рис. 6.** Определение степеней активации выходных термов

**Fig. 6.** The determination of the activation status of the output terms

5. Числовым значениям переменных высот степеней принадлежности присваиваются значения степеней принадлежности выходных термов (формула (11)):  $h_1 := \mu(C_1) = 0$ ;  $h_2 := \mu(C_2) = 0,4$ ;  $h_3 := \mu(C_3) = 0,6$ ;  $h_4 := \mu(C_4) = 0,1$ ;  $h_5 := \mu(C_5) = 0$  (рис.7).

	AK	AL
3	$h_1 = \mu(C_1)$	0
4	$h_2 = \mu(C_2)$	0,4
5	$h_3 = \mu(C_3)$	0,6
6	$h_4 = \mu(C_4)$	0,1
7	$h_5 = \mu(C_5)$	0

**Рис. 7.** Результат присвоения числовых значений переменным  $h_1-h_5$

**Fig. 7.** The result of assigning the numeric values to variables  $h_1-h_5$

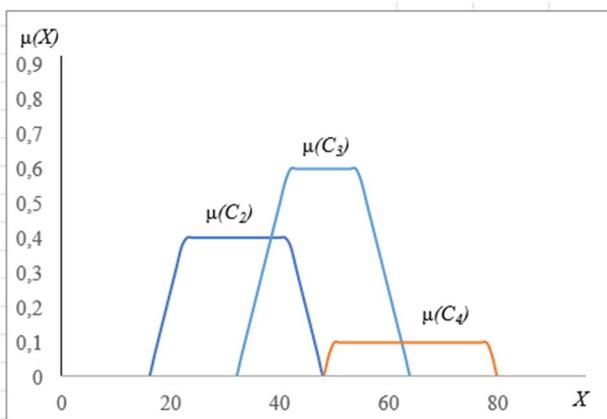
6. Далее происходит построение массива значений усеченных функций принадлежности по формуле (12) (рис.8). По полученному массиву был создан график преобразованных выходных функций принадлежности (рис.9). Длина нижнего основания функций принадлежности, рассчитанная выше, равна  $d_1=32$ , а длины верхних оснований, определяющиеся с помощью массива (формула (13)), равны  $d_{31}=0$ ;  $d_{32}=19$ ;  $d_{33}=13$ ;  $d_{34}=29$ ;  $d_{35}=0$ .

На рис. 9 представлен график выходных функций принадлежности после агрегации.

	R	S	T	U	V	W
19		$\mu(C_1)$	$\mu(C_2)$	$\mu(C_3)$	$\mu(C_4)$	$\mu(C_5)$
20	0	0	0	0	0	0
21	1	0	0	0	0	0
22	2	0	0	0	0	0
23	3	0	0	0	0	0
24	4	0	0	0	0	0
25	5	0	0	0	0	0
26	6	0	0	0	0	0
27	7	0	0	0	0	0
28	8	0	0	0	0	0
29	9	0	0	0	0	0
30	10	0	0	0	0	0
31	11	0	0	0	0	0
32	12	0	0	0	0	0
33	13	0	0	0	0	0
34	14	0	0	0	0	0
35	15	0	0	0	0	0
36	16	0	0	0	0	0
37	17	0	0,0625	0	0	0
38	18	0	0,125	0	0	0
39	19	0	0,1875	0	0	0
40	20	0	0,25	0	0	0
41	21	0	0,3125	0	0	0
42	22	0	0,375	0	0	0
43	23	0	0,4	0	0	0
44	24	0	0,4	0	0	0
45	25	0	0,4	0	0	0
46	26	0	0,4	0	0	0
47	27	0	0,4	0	0	0

**Рис. 8.** Фрагмент массива значений выходных переменных после агрегации

**Fig. 8.** The fragment of the array values of the output variables after aggregation



**Рис. 9.** Агрегация выходных функций принадлежности

**Fig. 9.** The aggregation of the output membership functions

Расчет площадей преобразованных функций принадлежности выходной переменной происходит по формулам (15):

$$S_{21} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АН}6 * (\text{АН}2 - \text{АН}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0 * (32 - 0) / 2; 2) = 0;$$

$$S_{22} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АО}6 * (\text{АО}2 - \text{АО}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0,4 * (32 - 19) / 2; 2) = 2,6;$$

$$S_{23} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АР}6 * (\text{АР}2 - \text{АР}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0,6 * (32 - 13) / 2; 2) = 5,7;$$

$$S_{24} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АQ}6 * (\text{АQ}2 - \text{АQ}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0,1 * (32 - 29) / 2; 2) = 0,15;$$

$$S_{25} = \text{ОКРУГЛ}(\text{АР}6 * (\text{АР}2 - \text{АР}4) / 2; 2) =$$

$$\text{ОКРУГЛ}(0 * (32 - 0) / 2; 2) = 0.$$

7. Расчет суммы всех полученных площадей (формула (17)) дал следующий результат  $S_{\text{общ}} = \text{СУММ}(\text{АН}8 : \text{АР}8) = 0 + 2,6 + 5,7 + 0,15 + 0 = 8,45$ .

На рис. 10 представлены результаты расчета пунктов 6 и 7 в табличном процессоре.

8. Определение отношения общей площади фигуры к площади фигуры с усеченными функциями принадлежности (формула (19)):  $D = \text{ОКРУГЛ}(\text{АТ}8 / \text{N}1; 2) = \text{ОКРУГЛ}(80 / 8,45; 2) = 0,11$ .

9. Дефазификация выходной переменной (формула (21)):

$$y_{\text{defuz}} = (\text{AV}2 * (\text{K}15 - \text{I}3)) + \text{I}3 =$$

$$= (0,11 * (96 - 0)) + 0 = 10,56.$$

На рис. 11 представлены результаты расчета пунктов 8 и 9 в табличном процессоре.

На рис. 12 представлена результирующая диаграмма метода отношения площадей.

	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT
1	$d_1$						
2	32	32	32	32	32		
3	$d_3$						
4	0	19	13	29	0		
5	$h$						
6	0	0,4	0,6	0,1	0		
7	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	$S_{24}$	$S_{25}$		$S_{общ}$
8	0	2,6	5,7	0,15	0		8,45

Рис. 10. Результаты вычисления значений  $S_1$ - $S_5$  и  $S_{общ}$

Fig. 10. The results of calculating values  $S_1$ - $S_5$  and  $S_{общ}$

	AV
1	$D$
2	0,11
3	
4	$y_{defuz}$
5	10,56

Рис. 11. Результаты вычисления значений  $D$  и  $y_{defuz}$

Fig. 11. The results of calculating values  $D$  and  $y_{defuz}$

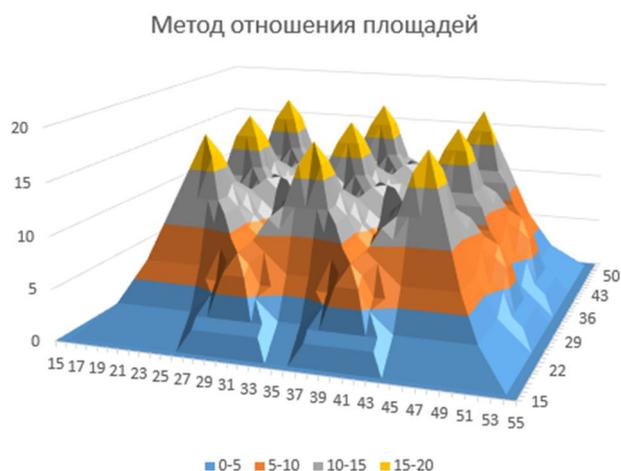


Рис. 12. Результирующая диаграмма метода отношения площадей

Fig. 12. The resulting diagram of the area ratio method

Полученная поверхность, изображенная на рис. 12, отображает зависимость между входными и выходными характеристиками нечетко-логической системы при применении метода отношения площадей. Из этого следует, что поставленная цель исследования достигнута.

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа быстродействия существующих дефазификаторов<sup>1</sup>.

Сравнительный анализ показал, что предложенный метод отношения площадей при реализации на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) имеет лучшее быстродействие по сравнению с существующими аналогами.

<sup>1</sup> Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечётких систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

**Таблица 2.** Сравнительный анализ быстродействия дефаззификаторов**Table 2.** The comparative analysis of the defuzzifiers' performance

Дефаззификатор / Defuzzifier	Время вычисления / Calculation time	
	50, МГц	200, МГц
Оптоэлектронный дефаззификатор (патент РФ №2408052)	$10^{-5}$ - $10^{-6}$ , с	
Оптоэлектронный дефаззификатор (патент РФ №2439651)	$10^{-5}$ - $10^{-6}$ , с	
Дефаззификатор на основе линейного метода отношения площадей (патент РФ №2701841)	590 нс	147,5 нс

### Выводы

В представленной статье рассмотрен метод отношения площадей, который позволяет визуализировать зависимость между входными и выходными переменными. Предложенный метод позволяет компенсировать ошибку при сужении интервала дефаззификации, что приводит к увеличению производительности и быстродействия нечёткой

системы. Моделирование метода отношения площадей проводилось в среде табличного процессора посредством визуального программирования. Подобное представление информации обеспечивает ряд преимуществ, таких как повышение качества программного продукта, обеспечение четкой структуризации задачи и доступность для восприятия человека.

### Список литературы

1. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 88. P. 106030.
2. Бобырь М.В., Храпова Н.И., Ламонов М.А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021;25(4):162-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>
3. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // *Measurement*. 2020. Vol. 152. P. 107378.
4. Adriyendi. Fuzzy Logic using Tsukamoto Model and Sugeno Model on Prediction Cost // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018. Vol. 10. No. 6. P. 13-21.
5. Сравнение алгоритмов MAMDANI и SUGENO в задаче процесса обучения ANFIS для оценки QOE доступа к интернет-услугам на базе пакета MATLAB / В. А. Гал-

кин, С. Н. Красильников, В. Б. Попенков, Х. К. Гонсалес-Гусев // Динамика сложных систем - XXI век. 2019. Т. 13, № 2. С. 28-33.

6. Wahyuni I., Mahmudy W. F. Rainfall prediction in Tengger, Indonesia using hybrid tsukamoto FIS and genetic algorithm method // Journal of ICT Research and Applications. 2017. Vol. 11, No. 1. P. 38-55.

7. Veshneva I., Bolshakov A., Kulik A. Increasing the safety of flights with the use of mathematical model based on status functions // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 199. P. 608-621.

8. Даев Ж. А., Султанов Н. З. Система автоматического контроля влажности природного газа на основе нечеткой модели Мамдани // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 10. С. 22-25.

9. Сабитов Р. М. Энергоэффективная система управления освещением парковой зоны // Шаг в науку. 2020. № 4. С. 47-52.

10. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для отбора игроков в футбольный клуб на предсезонных сборах / С. Т. Дусакаева, И. А. Хохлов, П. Л. Нирян, М. П. Носарев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4(76). С. 228-237.

11. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. А.Г. Подвесовского, Ю.В. Тюленцева. 2-е изд. М.: BINOM. Лаборатория знаний, 2013. 798 р.

12. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Математическая модель для нового метода дефаззификации в структуре нечеткого вывода // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. № 2. С. 218-220.

13. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. №9. С.32– 41.

14. Милостная Н. А. Быстродействующие дефаззификаторы, основанные на методе отношения площадей // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 11. С. 18-25.

15. Милостная Н.А. Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021;25(3):70-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.

16. Коварцев А.Н., Жидченко В.В., Попова-Коварцева Д.А. Методы и технологии визуального программирования. Самара: ООО «Офорт», 2017. С. 197.

17. Милостная Н.А. Компенсация ошибки сужения интервала дефаззификации методом отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023;13(1):111-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-111-122>.

18. Каид В. А. А. Методы построения функций принадлежности нечетких множеств // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2(139). С. 144-153.

19. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, vol. SMC-3, p. 28-44.

20. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетно-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. №5. С. 18-23.

## References

1. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, 106030 p.

2. Bobyr M.V., Khrapova N.I., Lamonov M.A. Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(4): 162-174. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>

3. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*, 2020, vol. 152, p. 107378.

4. Adriyendi. Fuzzy Logic using Tsukamoto Model and Sugeno Model on Prediction Cost. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 13-21.

5. Galkin V. A., Krasilnikov S. N., Popenkov V. B., Gonzalez-Gusev H. K. Sravnenie algoritmov MAMDANI i SUGENO v zadache protsessa obucheniya ANFIS dlya otsenki QOE dostupa k internet-uslugam na baze paketa MATLAB [Comparison of MAMDANI and SUGENO algorithms in the task of the ANFIS learning process for evaluating QOE access to Internet services based on the MATLAB package]. *Dinamika slozhnykh sistem - XXI vek = Dynamics of complex systems - XXI century*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 28-33.

6. Wahyuni I., Mahmudy W. F. Rainfall prediction in Tengger, Indonesia using hybrid tsukamoto FIS and genetic algorithm method. *Journal of ICT Research and Applications*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 38-55.

7. Veshneva I., Bolshakov A., Kulik A. Increasing the safety of flights with the use of mathematical model based on status functions. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, vol. 199, pp. 608-621.

8. Dayev J. A., Sultanov N. Z. Sistema avtomaticheskogo kontrolya vlazhnosti prirodnogo gaza na osnove nechetkoi modeli Mamdani [The system of automatic control of natural gas humidity based on the fuzzy Mamdani model]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti = Automation, telemekhanization and communication in the oil industry*, 2018, no. 10, pp. 22-25.

9. Sabitov R. M. Energoeffektivnaya sistema upravleniya osveshcheniem parkovoi zony [Energy-efficient lighting control system of the park zone]. *Shag v nauku = Step into science*, 2020, no. 4, pp. 47-52.
10. Dusakaeva S. T., Khokhlov I. A., Niryan P. L., Nosarev M. P. Primenenie algoritma nechetkoi logiki Mamdani dlya otbora igrokov v futbol'nyi klub na predsezonnnykh sborakh [Application of the Mamdani fuzzy logic algorithm for the selection of players to a football club at pre-season training camps]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2022, no. 4(76), pp. 228-237.
11. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow, BINOM Publ., 2013, 798 p.
12. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Matematicheskaya model' dlya novogo metoda defazzifikatsii v strukture nechetkogo vyvoda [Mathematical model for a new method of defuzzification in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika = Mechatronics, automation and robotics*, 2018, no. 2, pp. 218-220.
13. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei [Defuzzification of inference from the base of fuzzy rules based on the area difference method]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no.9, pp.32-41.
14. Milostnaya N. A. Bystrodeistvuyushchie defazzifikatory, osnovannye na metode otnosheniya ploshchadei [High-speed defuzzifiers based on the area ratio method]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial automated control systems and controllers*, 2021, no. 11, pp. 18-25.
15. Milostnaya N.A. Stability Study of a Neuro-Fuzzy Output System Based on Ratio Area Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(3):70-85 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.
16. Kovartsev A.N., Zhidchenko V.V., Popova-Kovartseva D.A. *Metody i tekhnologii vizual'nogo programirovaniya* [Methods and technologies of visual programming]. Samara, 2017, p. 197.
17. Milostnaya N.A. Compensation for the Error of Narrowing the Defuzzification Range by the Areas' Ratio Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023;13(1):111-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-111-122>
18. Kait V. A. A. Metody postroeniya funktsii prinadlezhnosti nechetkikh mnozhestv [Methods of constructing membership functions of fuzzy sets]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences*, 2013, no. 2(139), pp. 144-153.

19. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, vol. SMC-3, pp. 28-44.

20. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Adaptivnyi mul'tisetevoyts algoritm nechetno-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravlenie oborudovaniem s ChPU [Adaptive multi-network algorithm for fuzzy logic inference in the tasks of controlling CNC equipment]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*, 2013, no. 5, pp. 18-23.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Бобырь Максим Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat\_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

**Maxim V. Bobyr**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat\_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

**Храпова Наталия Игоревна**, аспирант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>

**Natalia I. Khrapova**, Post-Graduate Student of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>

## К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы ( $\Omega$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\omega$ ,  $\nu$  и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций ( $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\tg$  и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio\_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.