

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

# **Известия**

**Юго-Западного  
государственного  
университета**

**Научный журнал**

Том 26 № 4 / 2022

---

# **Proceedings**

**of the Southwest  
State University**

**Scientific Journal**

Vol. 26 № 4 / 2022



**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: 05.13.05; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6; 1.2.2.

**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:**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

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

**Бхатгачарья Сиддхартха PhD**, профессор, ректор Раджнагар Махалавидья (филиал Университета Бурдвана) (Индия);

**Бьянко Лино**, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (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**, профессор РАН, 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, Юго-Западный государственный университет (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);

**Грабовый Кирилл Петрович**, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский 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 №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2022



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 14.10.2022.

Дата выхода в свет 29.12.2022. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 20,8.

Тираж 1000 экз. Заказ 87.

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: 05.13.05; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6; 1.2.2..

## 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

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

## EDITORIAL BOARD

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

**Bhattacharya Siddhartha** PhD, Professor, Rector of Rajnagar Mahalavidya (Burdwan University Branch) (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);

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

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

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

**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);

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

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

**Roman V. Meshcheryakov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, 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);

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

**Grabovoy P. Kirill**, 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);

**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 №ФЦ77-42691 of 16.11.10).

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, 2022



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

Singed to print 14.10.2022.

Release date 29.12.2022. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 20,8.

Circulation 1000 copies. Order 87.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

<b>Анализ причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава .....</b>	<b>8</b>
<i>Рюмшин В. Ю., Чевычелов С. А.</i>	

### СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

<b>Тепловой режим в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов.....</b>	<b>22</b>
<i>Елистратова Ю. В., Семиненко А. С., Уваров В. А., Минко В. А.</i>	

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

<b>Исследование свойств алгоритма поиска в ширину для нахождения маршрута передвижения роботов .....</b>	<b>39</b>
<i>Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Крюков А. Г.</i>	

<b>Алгоритмы обработки информации в системе слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве .....</b>	<b>57</b>
<i>Трофименко Я.М., Ершов Е.В., Варфоломеев И.А.</i>	

<b>Алгоритм управления движением исполнительного механизма прибора для активно-пассивной механотерапии голеностопного сустава.....</b>	<b>75</b>
<i>Князев А.А., Федоров А.В., Яцун А.С.</i>	

<b>Оптимизация системы управления реализацией национальных проектов в регионе по критерию возврата к заданной целевой программе .....</b>	<b>88</b>
<i>Аверченкова Е.Э.</i>	

<b>Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора .....</b>	<b>103</b>
<i>Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А.</i>	

<b>Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения .....</b>	<b>117</b>
<i>Халин Ю.А., Катыхин А.И., Зинкин С.А., Шилин А.А.</i>	

<b>Выбор протокола приема передачи данных и разработка алгоритма выбора процессорного модуля «мастера» для реконфигурируемой вычислительной сети реального времени .....</b>	<b>132</b>
<i>Асеев Д. А., Борзов Д. Б., Титов В. С., Чернецкая И. Е.</i>	

<b>Метод оценки и прогнозирования экономических рисков предприятия на основе интеллектуального анализа данных .....</b>	<b>148</b>
<i>Халин Ю.А., Кринушина Ю.А., Зинкин С.А., Шилин А.А.</i>	

<b>Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы.....</b>	<b>162</b>
<i>Афонин Д.В., Кочергин О.Б., Яцун С.Ф.</i>	

<b>К сведению авторов.....</b>	<b>179</b>
--------------------------------	------------

## CONTENT

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

- Causes' Analysis of Cracks During Welding of High-Pressure Vessel Body Made of Titanium Alloy..... 8**  
*Ryumshin V. Y., Chevychelov S. A.*

### CONSTRUCTION

Original articles

- Thermal Condition in the Channels of Plate Heat Exchangers ..... 22**  
*Elistratova Y. V., Seminenko A. S., Uvarov V. A., Minko V. A.*

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

- Research of the Properties of the Breadth-First Search Algorithm for Finding the Movement Route of Robots ..... 39**  
*Emelianov S. G., Bobyr M. V., Kryukov A. G.*
- Information Processing Algorithms in the Steel-Teeming Ladles Tracking System in Steelmaking..... 57**  
*Trofimenko Y. M., Ershov E. V., Varfolomeev I. A.*
- Algorithm for Controlling the Movement of the Actuator of the Device for Active-Passive Mechanotherapy of the Ankle Joint ..... 75**  
*Knyazev A. A., Fedorov A. V., Yatsun A. S.*
- Optimization of the Management System for the Implementation of National Projects in the Region According to the Criterion of Returning to a Given Target Program ..... 88**  
*Averchenkova E. E.*
- Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier ..... 103**  
*Emelianov S. G., Bobyr M. V., Bondarenko B. A.*
- Cognitive Modeling of Information Support for Game-Based Automated Learning..... 117**  
*Khalin Y. A., Katykhin A. I., Zinkin S. A., Shilin A. A.*
- Selection of the Protocol for Receiving Data Transmission and Development of an Algorithm for Selecting the "Master" Processor Module for a Reconfigurable Real-Time Computer Network ..... 132**  
*Aseev D. A., Borzov D. B., Titov V. S., Chernetskaya I. E.*
- Method for Assessing and Forecasting Economic Risks of an Enterprise Based on Data Mining..... 148**  
*Khalin Yu.A., Kriushina Yu.A., Zinkin S.A., Shilin A.A.*
- Information System of the Robotic Towing Airfield System ..... 162**  
*Afonin D. V., Kochergin O. B., Yatsun S. F.*
- Information of the authors ..... 179**

### Анализ причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава

В. Ю. Рюшин<sup>1</sup>, С. А. Чевычелов<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Тураевское машиностроительное конструкторское бюро "Союз",  
тер. промзона Тураево, стр. 10, Московская область, г. Лыткарино 140080, Российская Федерация

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

#### Резюме

**Целью исследования** является выявление причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава.

**Методами** цветной дефектоскопии, рентгеноскопии и исследованием шлифов рассмотрены и изучены особенности микроструктуры сварного соединения корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава. Выявлены причины возникновения трещин корпусов сосудов высокого давления, которыми являются совокупность внутренних напряжений и особенности конструкций.

**Результаты.** Исходя из анализа микроструктуры вырезанных образцов следует, что штамповка силового элемента поставлялась без предварительной термообработки. Образование очагов трещин на внутренней поверхности силового элемента, в месте перехода сплава в район площадки крепления, в первую очередь связано с большими объемными внутренними напряжениями, которые дополнительно суммируются с поверхностными напряжениями от механообработки и термическими напряжениями при сварке. Исходя из полученных данных следует, что при использовании специализированной оснастки с медной подкладкой, обеспечивающей поддув инертного газа, сварочные напряжения в зоне шва уменьшаются на несколько порядков, по сравнению с участком, где оснастка была без медной подкладки.

В результате проведенного исследования выявлено, что причинами возникновения трещин корпусов сосудов высокого давления является совокупность внутренних напряжений вследствие отсутствия предварительной термической обработки силовых элементов из титанового сплава, входящих в состав сосуда высокого давления, а также напряжений, возникающих при сварке силового элемента с обечайками с учетом особенностей конструкции.

**Заключение.** Для устранения причины возникновения трещин была проведена дополнительная опытная работа, заключающаяся в наплавке ручной АДС усилительного валика в зону максимальных напряжений силового элемента. Предложенное решение оправдало ожидания – все корпуса сосудов высокого давления прошли гидравлические испытания, что позволило сохранить материальную часть.

**Ключевые слова:** сосуды высокого давления; титановый сплав; силовой элемент изделия; цветная дефектоскопия; рентгеноскопия; шлифы; термообработка; сварочные напряжения.

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

**Для цитирования:** Рюмшин В. Ю., Чевычелов С. А. Анализ причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 8-21. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-8-21>.

Поступила в редакцию 28.07.2022

Подписана в печать 19.08.2022

Опубликована 14.10.2022

## Causes' Analysis of Cracks During Welding of High-Pressure Vessel Body Made of Titanium Alloy

Vadim Y. Ryumshin <sup>1</sup>, Sergey A. Chevychelov <sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Turaevskoe Machine-Building Design Bureau "Soyuz"  
ter. Turaevo industrial zone, building 10, Moscow region, Lytkarino 140080, Russian Federation

<sup>2</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of reseach** is to identify the causes of cracks during welding of high-pressure vessel body made of titanium alloy.

**Methods.** Features of welded joint microstructure of high-pressure vessel body made of titanium alloy are described and studied by color flaw detection methods, fluoroscopy, and examination of the cuts. The causes of cracks in the bodies of pressure vessels are identified. The causes are a combination of internal stresses and structures features.

**Results.** Based on the analysis of cut samples microstructure, it follows that the stamping of the power element was supplied without preliminary heat treatment. The formation of crack foci on the inner surface of the power element, at the place of alloy transition to the area of the attachment site, is primarily associated with large volumetric internal stresses, which are additionally summed up with surface stresses from machining and thermal stresses during welding. Based on the obtained data, it follows that when using a specialized tooling with a copper backing that provides pressurization of inert gas, welding stresses in a weld area are reduced by several orders of magnitude compared to the area where the tooling was without copper backing. As a result of the study, it was revealed that the causes of cracks in the bodies of high-pressure vessels are a combination of internal stresses due to the lack of preliminary thermal treatment of power elements made of titanium alloy, which are part of a high-pressure vessel, as well as stresses arising during welding of the power element with shells, considering design features.

**Conclusion.** To eliminate the cause of cracks, additional experimental work was carried out. Surfacing the manual ADF of reinforcing roller into the zone of maximum stresses of the power element was done. The proposed solution met expectations - all the bodies of high-pressure vessels passed hydraulic tests, which made it possible to preserve material part.

**Keywords:** pressure vessels; titanium alloy; power element of the product; color flaw detection; fluoroscopy; splines; heat treatment; welding stresses.

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

**For citation:** Ryumshin V. Y., Chevychelov S. A. Causes' Analysis of Cracks During Welding of High-Pressure Vessel Body Made of Titanium Alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 8-21 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-8-21>.

Received 28.07.2022

Accepted 19.08.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

## Введение

Одним из основных материалов для производства деталей реактивных двигателей является титан и титановые сплавы, которые по своим физико-механическим свойствам и технологичности превосходят большинство современных конструкционных материалов, включая самые распространенные сталь и алюминий [1,2].

Ключевой проблемой использования титановых сплавов в машиностроении является широкий спектр вопросов, возникающих при сварке данного материала [3-8] в том числе аргонодуговой [9].

При проведении испытаний на предприятии-изготовителе корпусов сосудов высокого давления, изготовленных из

укомплектованных силовых элементов определенной партии, происходило их разрушение в виде образование трещин в околошовной зоне сварного соединения, соединяющего силовой элемент и обечайку в районе площадки крепления со стороны силового элемента (рис. 1).

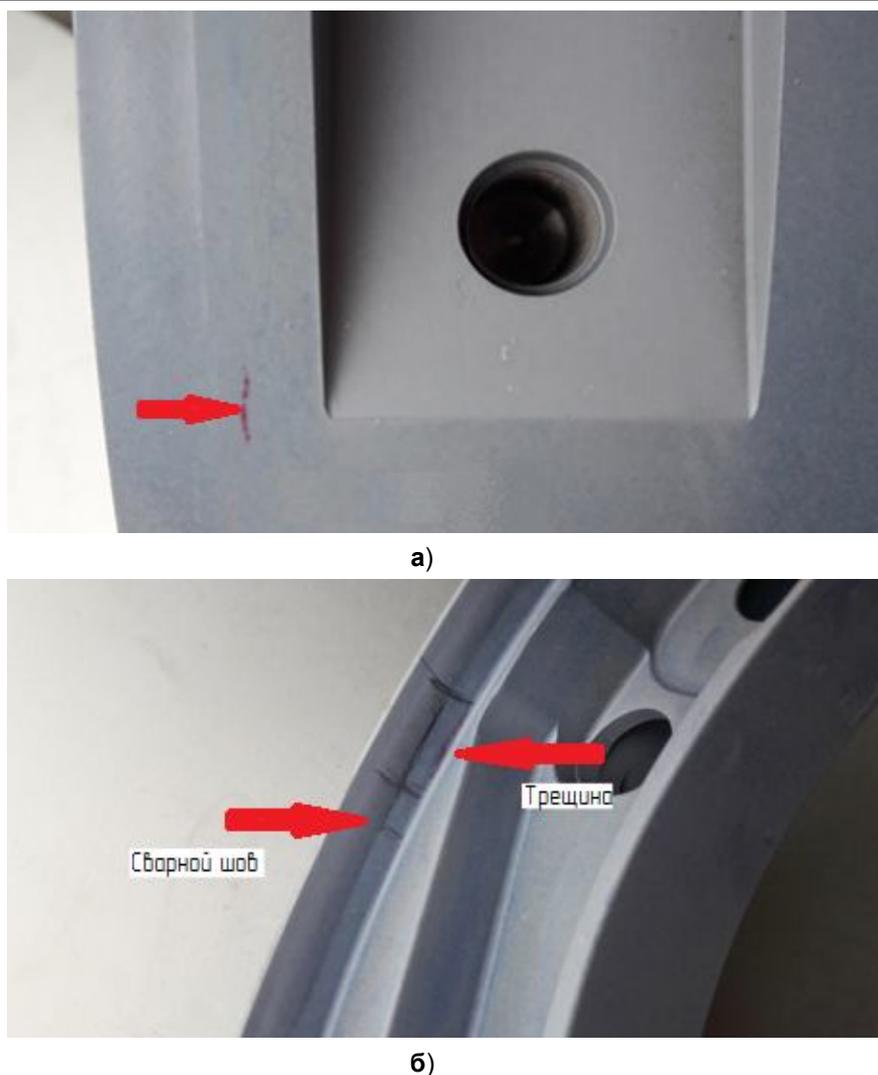
В результате визуального осмотра места разрушения после цветной дефектоскопии на обемх поверхностях силового элемента выявлена трещина, локализация которой с внутренней стороны привязана к площадке крепления рядом со варным швом (рис. 2).

Целью исследования является выявление причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава.



**Рис. 1.** Трещина, возникшая при гидравлических испытаниях в околошовной зоне

**Fig. 1.** Crack that occurred during hydraulic tests in the near-weld area



**Рис. 2.** Вид трещины, выявленный методом цветной дефектоскопии: **а** – наружная поверхность силового элемента; **б** – внутренняя поверхность силового элемента)

**Fig. 2.** Type of crack detected by color flaw detection: **a** – outer surface of load-bearing element; **б** – inner surface of force element)

## Материалы и методы

Наличие влаги в аргоне ведет к повышению содержания водорода в металле шва, к образованию вольфрамовых включений и снижает эксплуатационные характеристики шва. Было проведено измерение точки росы, для определения наличия влаги в баллонах аргона, используемых для сварки корпуса сосуда высокого давления.

При поступлении новой партии газа на предприятие, каждый баллон подвергается проверке на наличие влаги гигрометром, если обнаруживается превышение по содержанию водяных паров, производится кантовка баллона на 24 часа с последующим открытием вентиля и сбросом влаги<sup>1</sup>.

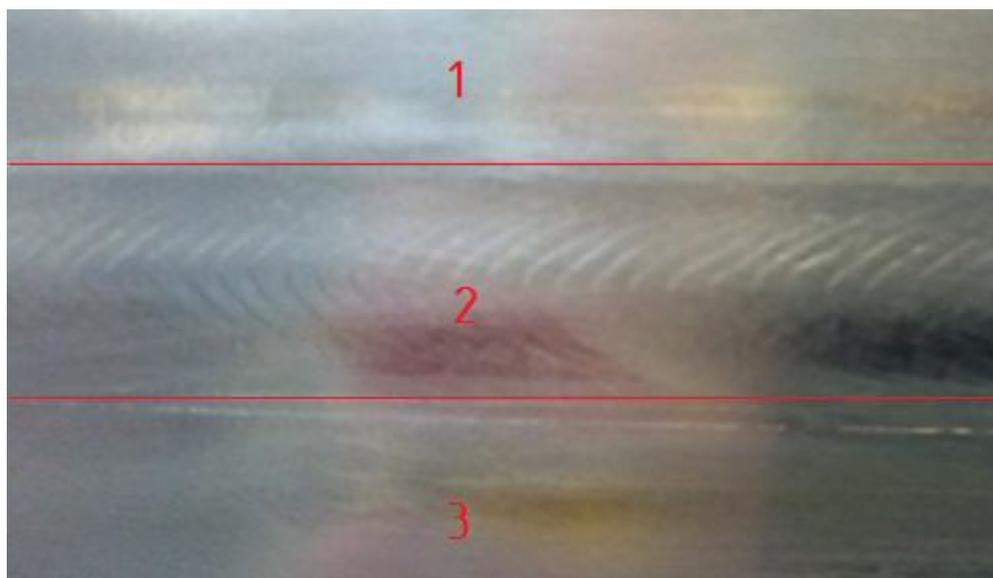
<sup>1</sup> Сварка дуговая сплавов титана в среде защитных газов ПИ 1.4.1898-2003: Производственная инструкция. М.: ОАО НИАТ, 2003. 122 с.

Баллоны, которые используются для сварки корпусов сосудов высокого давления, проходят дополнительную проверку перед сваркой. Баллоны, в которых точка росы выше - 61 градус, не допускаются для сварки данного изделия и отправляются на кантовку, с последующим удалением влаги, после че-

го используются для сварки ответственных узлов.

На рентгеновских снимках сварного шва, соединяющего силовой элемент и обечайки, дефектов обнаружено не было.

Проведен визуальный осмотр поверхности кольцевых сварных швов №1 (обечайка + силовой элемент + обечайка) корпуса сосуда высокого давления (рис. 3).



**Рис. 3.** Внешний вид исследуемого сварного соединения: участки 1 – обечайка; 2 – сварной шов; 3 – силовой элемент

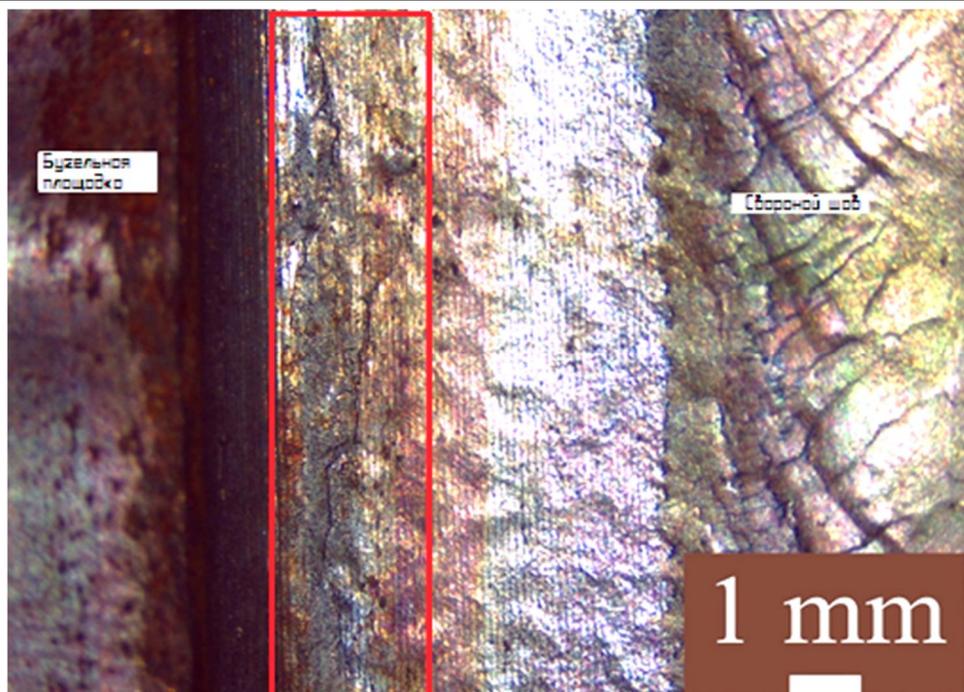
**Fig. 3.** Appearance of the tested welded joint: sections 1 – shell; 2 – welded joint; 3 – power element

Проверка толщины стенкомером, вырезанного образца силового элемента в месте трещины показала – толщина стенки сплава по всей длине трещины и толщина стенок основного металла в зоне сварки составляет 1.8 мм, что соответствует требованиям конструкторской документации.

Изучена внутренняя поверхность вырезанных образцов. На снимках, сделанных с помощью микроскопа, выявлены множественные очаги зарождения

трещин в районе прилегания площадки крепелния силового элемента (рис. 4).

Проверка микроструктуры торцевой части образца показала, что структура сплава неоднородная, зерна разнонаправленные. Микроструктура соответствует 5 баллу (9-балльной шкалы) инструкции № 1054-76 «Металлографический анализ титановых сплавов» (Всероссийский институт авиационных материалов) (рис. 5 – зона трещины, рис. 6 – зона основного металла).

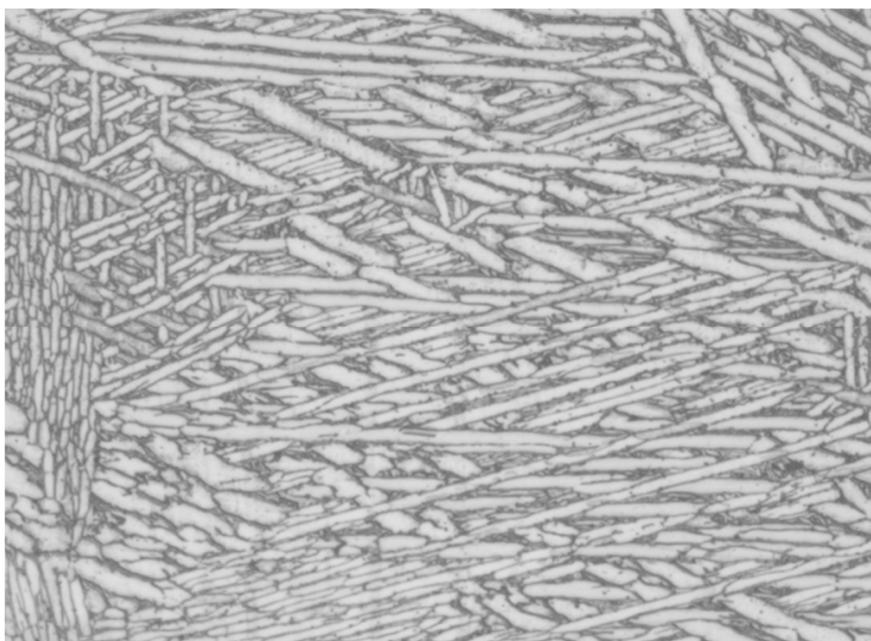


**Рис. 4.** Места зарождения трещин (внутренняя сторона шва)

**Fig. 4.** Points of cracks origin (inner side of a weld)

Твёрдость сердцевины сварного шва и поверхностного слоя составляет 390-410 HV, в сравнении с основным металлом, твёрдость которого равна

370-390 HV. Можно сделать вывод, что альфированный слой на поверхности и внутри сварного соединения отсутствует [10].



**Рис. 5.** Микроструктура основного металла

**Fig. 5.** Base metal microstructure

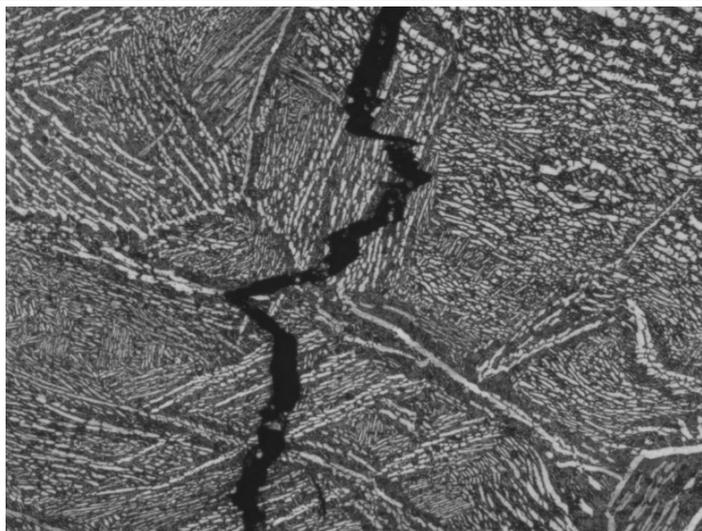


Рис. 6. Микроструктура сплава в зоне трещины

Fig. 6. Alloy microstructure in the crack area

### Результаты и их обсуждение

Исходя из анализа микроструктуры вырезанных образцов следует, что штамповка силового элемента поставлялась без предварительной термообработки. Структура силового элемента, не подвергаемого предварительно отжигу, имеет объемно неоднородную макро- и микроструктуру (табл. 1), характеризующуюся большими объемными внутренними напряжениями. Микроструктура после отжига более выровненная и более однородная, по сравнению со структурой сплава, который не прошел термообработку, что увеличивает способность металла к процессу пластической релаксации напряжений [11-16].

Образование очагов трещин на внутренней поверхности силового элемента, в месте перехода сплава в район площадки крепления, в первую очередь связано с большими объемными внутренними напряжениями, которые дополнительно суммируются с поверх-

ностными напряжениями от механообработки и термическими напряжениями при сварке.

Проведенный расчет в специальном программном комплексе SolidWorks [17] позволил установить влияние процесса сварки силового элемента сосуда высокого давления и обечаек на образование напряжений и деформаций в сварном соединении, а также в околошовной зоне и прилегающем металле (рис. 7).

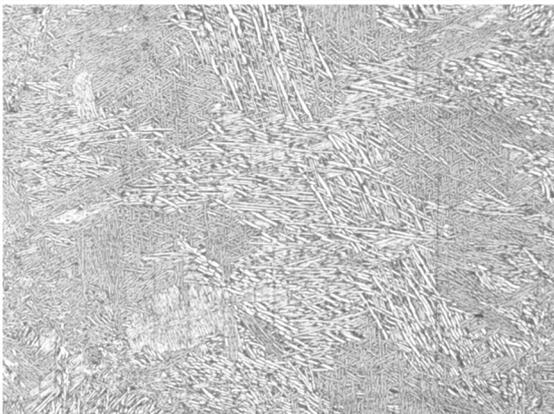
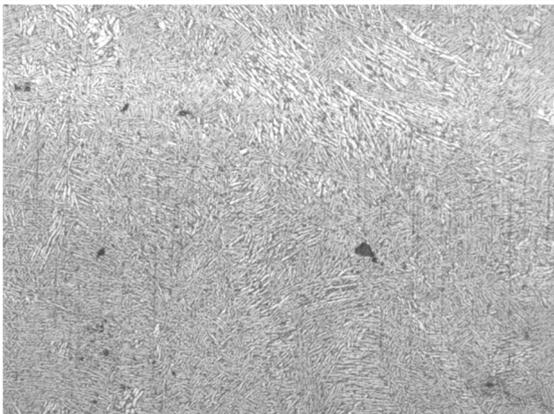
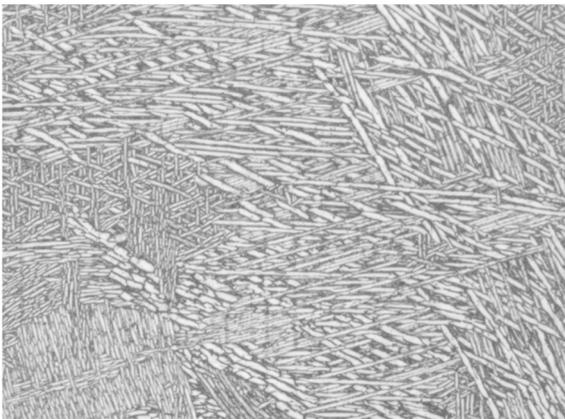
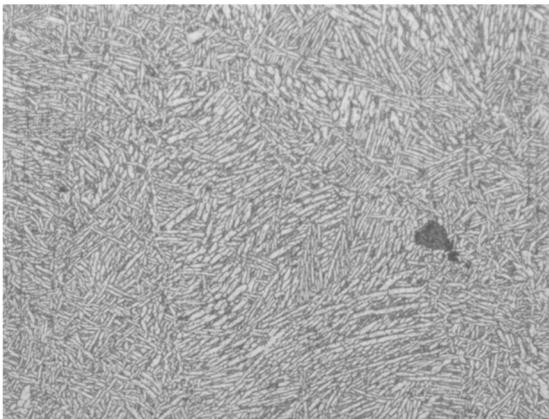
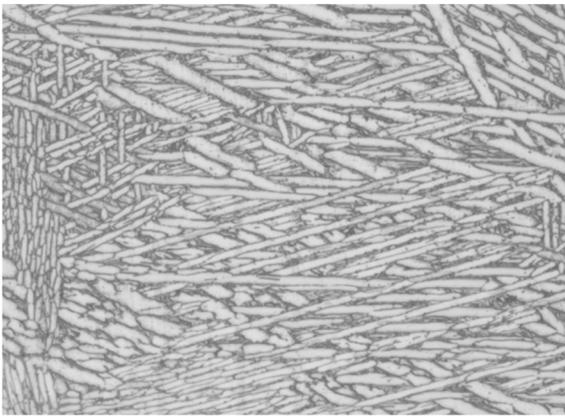
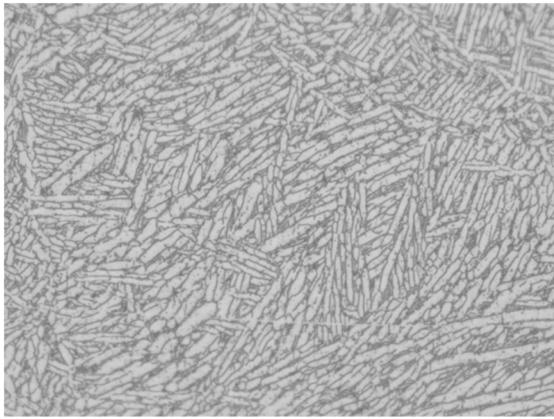
Исходя из полученных данных следует, что при использовании специализированной оснастки с медной подкладкой, обеспечивающей поддув инертного газа, сварочные напряжения в зоне шва уменьшаются на несколько порядков, по сравнению с участком, где оснастка была без медной подкладки, но с учетом особенностей конструкции силового элемента, заключающихся в резком переходе площадки крепления к основному металлу, после сварки остаются эквивалентные напряжения, равные

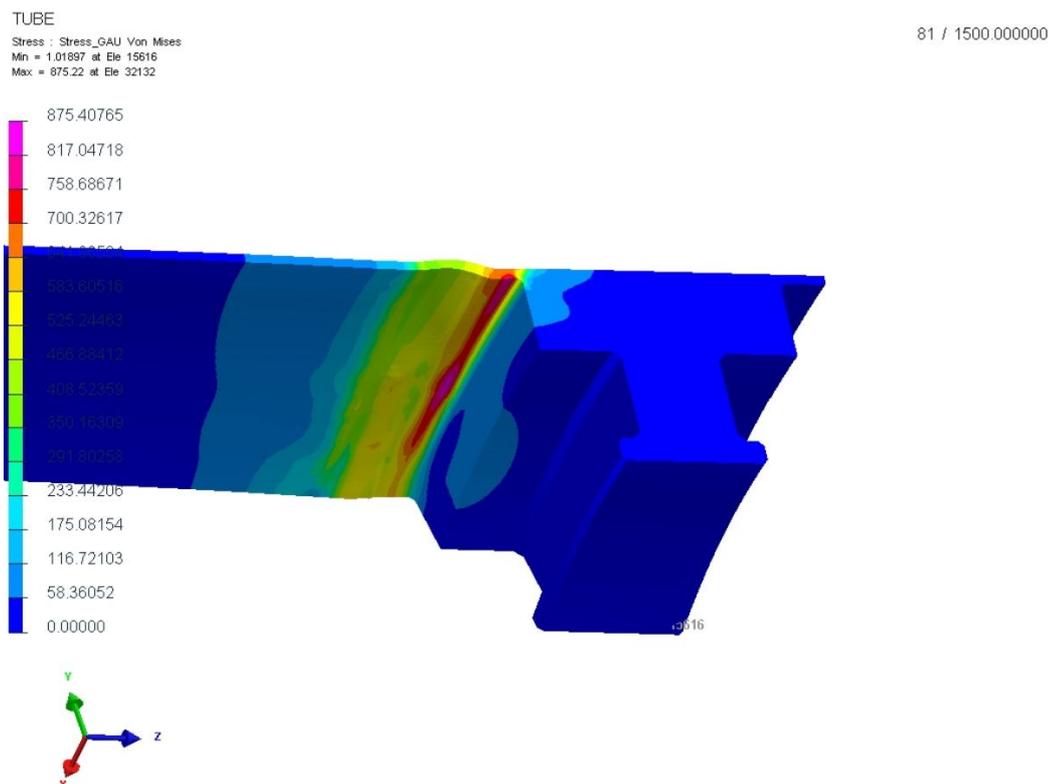
около 700 МПа, что является критическим показателем напряжений для данного материала даже несмотря на

последующую термообработку после сварки по режиму 640 градусов Цельсия в течение полутора часов [18, 19].

**Таблица 1.** Микроструктура образцов сплава VT20 (силовой элемент) до и после термообработки

**Table 1.** Microstructure of VT20 alloy samples (power element) before and after heat treatment

Сплав	Микрошлифы / Microslips	
	До термообработки / Before heat treatment	После термообработки / After heat treatment
X50		
X100		
X200		



**Рис. 7.** Расчет остаточных напряжений и деформаций в зоне сварного соединения

**Fig. 7.** Calculation of residual stresses and deformations in welded joint area

Расчет методом конечных элементов процесса [17] гидравлических испытаний с учетом требований чертежа – нагрузка  $500 \text{ Н/см}^2$ , позволил проанализировать поведение корпуса сосуда высокого давления при нагрузках, а также учесть полученные напряжения при испытаниях в суммарных напряжениях всей конструкции, в особенности в местах возникновения трещин. Напряжения в районе площадки крепления, исходя из данных, полученных при расчете, равны 450-490 МПа, средние напряжения по корпусу сосуда высокого давления равны 360-390 МПа.

## Выводы

В результате проведенного исследования выявлено, что причинами воз-

никновения трещин корпусов сосудов высокого давления являются совокупность внутренних напряжений вследствие отсутствия предварительной термической обработки силовых элементов из титанового сплава, входящих в состав сосуда высокого давления, а также напряжений, возникающих при сварке силового элемента с обечайками с учетом особенностей конструкции.

С учетом нагрузки, возникающей при гидравлических испытаниях на прочность, суммарные напряжения, даже после термической обработки после сварки, превышают предел прочности материала изделия (ВТ20), вследствие чего происходит разрушение корпусов сосудов высокого давления в зонах максимальных напряжений (перехода

основного металла в район площадки крепления).

Для устранения причины возникновения трещин была проведена дополнительная опытная работа, заключающаяся в наплавке ручной аргоно-дуговой сваркой усилительного валика в зону

максимальных напряжений силового элемента. Предложенное решение оправдало ожидания – все корпуса сосудов высокого давления прошли гидравлические испытания, что позволило сохранить материальную часть и сократить убытки.

### Список литературы

1. Хорев М. А., Хорев А. И. Титановые сплавы, их применение и перспективы развития // *Материаловедение*. 2005. № 7. С. 25-34. EDN KNXORN.
2. Бабко А. П., Клешина О. Н. Технологические особенности лазерной сварки титановых сплавов // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 года*. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. С. 24-26. EDN NBUAYL.
3. Онучин С. В., Проскурин В. Д. Автоматическая аргонодуговая сварка криволинейных швов изделий из титана // *Промышленность: новые экономические реалии и перспективы развития: сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием): в 2 ч., Оренбург, 17 мая 2017 года*. Оренбург: Агентство Пресса, 2017. С. 232-237. EDN ZNMRZH.
4. Солодков М. Ж., Сеница А. Н. Компьютерное моделирование температурных полей при сварке титана // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции / редколлегия: М.Е. Лустенков [и др.]*. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2019. С. 169. EDN CZKDWА.
5. Барменков В. В. Особенности сварки титана // *Вестник магистратуры*. 2019. № 1-2(88). С. 74-75. EDN YVSSRN.
6. Owa T., Kondo T., Takizawa H. *Welding Int.* 2010. Vol.24. P. 182-187.
7. Шишкин М. В. Сварка титана // *Научному прогрессу – творчество молодых*. 2018. № 2. С. 55-56. EDN YKWAPB.
8. Улановская А. И., Евин А. М., Бахматов П. В. Исследование влияния качества присадочной проволоки на свойства сварных соединений из сплава ВТ 20 // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXI Международной научно-практической конференции: в 2 ч. / под ред. Е.В. Протопопова*. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. С. 335-339. EDN RWYOPB.

9. Технологические особенности сварки титана импульсной дугой / С. А. Соловьев, В. И. Денисов, Б. А. Матюшкин, А. А. Толкачев // Сварочное производство. 2017. № 3. С. 3-8. EDN WOFJJM.
10. Коломенский А. Б., Шахов С. В., Коломенский Б. А. Влияние газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 132-139. EDN YKJXFX.
11. Zhu Z.X., Marimuthu M., Kuzmikova L. et al. Influence of Ti/N ratio on simulated CGHAZ microstructure and toughness in X70 steels // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. Vol. 18, no. 1. P. 45-51.
12. Yan W., Shan Y.Y., Yang K. Influence of TiN inclusions on the cleavage fracture behavior of low-carbon microalloyed steels // Metallurgical and Materials Transactions A. 2007. Vol. 38, no. 6. P. 1211-1222.
13. Echeverría A., Rodriguez-Ibabe J. M. The role of grain size in brittle particle induced fracture of steels // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 346, no. 1-2. P. 149-158. DOI 10.1016/S0921-5093(02)00538-5. EDN KLILV.
14. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного титанового сплава / И. Р. Козлова, Е. В. Чудakov, Н. В. Третьякова [и др.] // Вопросы материаловедения. 2019. № 4(100). С. 28-41. DOI 10.22349/1994-6716-2019-100-4-28-41. EDN SQBXNP.
15. Рюмшин В. Ю., Чевычелов С. А. Исследование возможности применения активирующего флюса для повышения производительности аргонодуговой сварки жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ // Сварочное производство. 2022. № 9. С. 45-49.
16. Структурно-фазовые превращения при сварке высоколегированного сплава титана / В. И. Михайлов, И. Р. Козлова, С. В. Кузнецов [и др.] // Вопросы материаловедения. 2021. № 3(107). С. 63-81. DOI 10.22349/1994-6716-2021-107-3-63-81. EDN UXULMN.
17. Программное обеспечение машинной графики / А.А. Котельников, А.Ю. Головенков, А.С. Натаров, В.Ю. Рюмшин. Курск: Юго-Западный гос. ун-т., 2019. 231 с.
18. Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / под ред. Б.А. Колачева. М.: Экомет, 2003. 351 с. EDN QMZLMD.
19. Хорев А. И. Основы термической обработки и сварки высокопрочных ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов // Технология машиностроения. 2013. № 8. С. 5-11. EDN RTKTVD.

## References

1. Horev M. A., Horev A. I. Titanovye splavy, ih primeneniye i perspektivy razvitiya [Titanium alloys, their application and prospects lit up]. Materialovedeniye, 2005, no. 7, pp. 25-34.

2. Babko A. P., Kleshnina O. N. Tekhnologicheskie osobennosti lazernoj svarki titanovyh splavov [Technological features of laser welding of titanium alloys]. *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij: materialy II Vserossijskoj nacional'noj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* [Youth and Science: actual problems of fundamental and applied research. Materials of the II All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj universitet Publ., 2019, pp. 24-26. EDN NBUAYL.

3. Onuchin S. V., Proskurin V. D. Avtomaticheskaya argonodugovaya svarka krivolinejnyh shvov izdelij iz titana [Automatic argon arc welding of curved seams of titanium products]. *Promyshlennost': novye ekonomicheskie realii i perspektivy razvitiya. Sbornik statej I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Industry: New economic realities and development prospects: collection of articles of the I All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)]. Orenburg, Agentstvo Pressa Publ., 2017, pp. 232-237. EDN ZNMRZH.

4. Solodkov M. Zh., Sinica A. N. Komp'yuternoe modelirovanie temperaturnyh polej pri svarke titana [Computer simulation of temperature fields during titanium welding]: *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Materials, equipment and resource-saving technologies: Materials of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, 2019, pp. 169. EDN CZKDWA.

5. Barmenkov V. V. Osobennosti svarki titana [Features of titanium welding]. *Vestnik magistratury = Bulletin of the Magistracy*, 2019, no. 1-2(88), pp. 74-75. EDN YVSSRN.

6. Owa T., Kondo T., Takizawa H. *Welding Int.* 2010, vol.24, pp. 182-187.

7. Shishokin M. V. Svarka titana [Welding of titanium]. *Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodyh = Scientific progress – creativity of the young*, 2018, no. 2, pp. 55-56. EDN YKWAPB.

8. Ulanovskaya A. I., Evin A. M., Bahmatov P. V. Issledovanie vliyaniya kachestva prisadochnoj provoloki na svoystva svarnyh soedinenij iz splava VT 20 [Investigation of the influence of the quality of filler wire on the properties of welded joints made of alloy VT 20]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Trudy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Metallurgy: Technologies, innovations, quality. Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference]. Novokuzneck: Sibirskij gosudarstvennyj industrial'nyj universitet Publ., 2019, pp. 335-339. EDN RWYOPB.

9. Solov'ev S. A., Denisov V. I., Matyushkin B. A., Tolkachev A. A. Tekhnologicheskie osobennosti svarki titana impul'snoj dugoj [Technological features of titanium pulsed arc welding]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2017, no. 3, pp. 3-8. EDN WOFJMM.

10. Kolomenskij A. B., Shahov S. V., Kolomenskij B. A. Vliyanie gazonasyshchennyh sloyov i oksidnyh plyonok na udarnuyu vyazkost' titanovyh splavov razlichnyh grupp prochnosti [The effect of gas-saturated layers and oxide films on the impact strength of titanium alloys of various strength groups]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017. vol. 13, no. 2, pp. 132-139. EDN YKJXFX.

11. Zhu Z.X., Marimuthu M., Kuzmikova L. et al. Influence of Ti/N ratio on simulated CGHAZ microstructure and toughness in X70 steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18, no. 1, pp. 45-51.

12. Yan W., Shan Y.Y., Yang K. Influence of TiN inclusions on the cleavage fracture behavior of low-carbon microalloyed steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, vol. 38, no. 6, pp. 1211-1222.

13. Echeverría A., Rodriguez-Ibabe J. M. The role of grain size in brittle particle induced fracture of steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 346, no 1-2, pp. 149-158. DOI 10.1016/S0921-5093(02)00538-5. EDN KLIILV.

14. Kozlova I. R., CHudakov E. V., Tret'yakova N. V. [i dr.]. Vliyanie termicheskoy obrabotki na formirovanie struktury i uroven' mekhanicheskikh svojstv vysokolegированного титанового сплава [The effect of heat treatment on the formation of the structure and the level of mechanical properties of a high-alloy titanium alloy]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of Materials Science*, 2019, no.4(100), pp. 28-41. DOI 10.22349/1994-6716-2019-100-4-28-41. EDN SQBXNP.

15. Ryumshin V. Yu., Chevychelov S. A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya aktiviruyushchego flyusa dlya povysheniya proizvoditel'nosti argonodugovoj svarki zharoprochnogo nikel'evogo сплава HN60VT [Investigation of the possibility of using an activating flux to increase the productivity of argon arc welding of heat-resistant nickel alloy HN60W]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2022, no. 9, pp. 45-49.

16. Mihajlov V. I., Kozlova I. R., Kuznecov S. V. [i dr.]. Strukturno-fazovye prevrashcheniya pri svarke vysokolegированного сплава титана [Structural-phase transformations during welding of high-alloy titanium alloy]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of Materials Science*, 2021, no. 3(107), pp. 63-81. DOI 10.22349/1994-6716-2021-107-3-63-81. EDN UXULMN.

17. Kotel'nikov A.A., Golovenkov A.Yu., Natarov A.S., Ryumshin V.Yu. *Programmnoe obespechenie mashinnoj grafiki* [Machine graphics software]. Kursk, YUgo-Zapadnyj gos. un-t Publ., 2019. 231 p.

18. Lyasockaya V. S. *Termicheskaya obrabotka svarnyh soedinenij titanovyh splavov* [Heat treatment of welded joints of titanium alloys]; ed by B.A. Kolacheva. Moscow, Ekomet Publ., 2003. 351 p. EDN QMZLMD.

19. Horev A. I. Osnovy termicheskoy obrabotki i svarki vysokoprochnyh ( $\alpha+\beta$ )-titanovyh splavov [Fundamentals of heat treatment and welding of high-strength ( $\alpha+\beta$ )-titanium alloys]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Mechanical Engineering Technology*, 2013, no. 8, pp. 5-11. EDN RTKTVD.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Рюмшин Вадим Юрьевич**, главный сварщик,  
АО Тураевское машиностроительное  
конструкторское бюро "Союз", Московская область,  
г. Лыткарино, Российская Федерация,  
e-mail: rouch220@yandex.ru

**Vadim Y. Ryumshin**, Chief Welder,  
JSC Turaevskoe Machine-Building Design  
Bureau "Soyuz", Moscow region,  
Lytkarino, Russian Federation,  
e-mail: rouch220@yandex.ru

**Чевычелов Сергей Александрович**, кандидат  
технических наук, заведующий кафедрой  
«Машиностроительные технологии  
и оборудование», Юго-Западный  
государственный университет,  
г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: tschsa@yandex.ru

**Sergey A. Chevychelov**, Cand. of Sci.  
(Engineering), Head of the Machine-building  
Technologies and Equipment Department,  
Southwest State University,  
Kursk, Russian Federation,  
e-mail: tschsa@yandex.ru

## Тепловой режим в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов

Ю. В. Елистратова <sup>1</sup> ✉, А. С. Семиненко <sup>1</sup>, В. А. Уваров <sup>1</sup>, В. А. Минко <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: [tgv.info@mail.ru](mailto:tgv.info@mail.ru)

### Резюме

*Оснащение тепловых пунктов теплообменным оборудованием с поверхностью нагрева в виде гофрированных пластин является неотъемлемым структурным элементом теплоэнергетической сети 3-го поколения и составляющей надежности работы системы теплоснабжения в целом. Установлено, что проведение оптимизационных расчетов теплообменных аппаратов указанного типа затруднено ввиду отсутствия зависимостей по теплообмену и гидравлическому сопротивлению между каналами в конструктивном пространстве теплообменника.*

**Цель исследования.** Уточнить методику расчета пластинчатых теплообменных аппаратов, исключая равенство тепловых и гидравлических условий из общепринятых допущений.

**Методы.** Методология исследования базируется на использовании закона сохранения масс с целью определения температурных параметров рабочих жидкостей в каждом канале. Решение данной задачи предложено в виде системы уравнений, каждое из уравнений характеризует тепловой баланс рассматриваемого канала. Построена компьютерная модель теплообменного аппарата с целью проведения численного исследования теплового режима теплообменника.

**Результаты.** Указано, что в качестве допущения в общеизвестной математической модели расчета теплового режима теплообменника пластинчатого типа принято условие равного распределения потоков жидкости между каналами. Такое ограничение приводит к уравниванию температур жидкости в каждом канале. Учет геометрического расположения каналов устанавливает превышение конечной температуры греющего и нагреваемого теплоносителя в первом и последнем каналах по отношению к известным данным до 10%. Результаты исследования подтверждают гипотезу о неравномерном нагреве теплоносителя по длине пакета пластин из-за неравномерности потокораспределения между каналами.

**Заключение.** Полученные результаты аналитического и численного моделирования свидетельствуют о существенном влиянии геометрического расположения на тепловой режим в каналах. Сформулированное математическое описание температурного режима с учетом гидравлических условий распределения потоков между каналами рекомендуется использовать при совершенствовании конструктивных параметров теплообменных аппаратов пластинчатого типа.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; пластинчатые теплообменные аппараты; тепло-гидравлические; поверхность теплообмена; потокораспределение; численные исследования.

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

**Финансирование:** Исследования проводились в рамках Гранта Президента Российской Федерации для ведущей научной школы № НШ-25.2022.4 с использованием оборудования Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

**Для цитирования:** Тепловой режим в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов / Ю. В. Елистратова, А. С. Семенов, В. А. Уваров, В. А. Минко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 22-38. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-22-38>.

Поступила в редакцию 10.08.2022

Подписана в печать 03.10.2022

Опубликована 14.10.2022

## Thermal Condition in the Channels of Plate Heat Exchangers

Yulia V. Elistratova <sup>1</sup> ✉, Artem S. Seminenko <sup>1</sup>, Valery A. Uvarov <sup>1</sup>,  
Vsevolod A. Minko <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: [tg.v.info@mail.ru](mailto:tg.v.info@mail.ru)

### Abstract

*Equipping heat points with plate-type heat exchangers is an integral structural element of the 3rd generation heat and power network and a component of the reliability of the heat supply system as a whole. It has been established that the optimization calculations of heat exchangers of this type are difficult due to the absence of dependences on heat transfer and hydraulic resistance between the channels in the structural space of the heat exchanger.*

**Purpose of research.** *To clarify the method of calculating plate heat exchangers, excluding the equality of thermal and hydraulic conditions from the generally accepted assumptions.*

**Methods.** *The research methodology is based on the use of the law of conservation of mass in order to determine the temperature parameters of working fluids in each channel. The solution of this problem is proposed in the form of a system of equations, each of the equations of which characterizes the thermal balance of the channel under consideration. A computer model of the heat exchanger is constructed in order to conduct a numerical study of the thermal regime of the heat exchanger.*

**Results.** *It is indicated that as an assumption in the well-known mathematical model for calculating the thermal regime of a plate-type heat exchanger, the condition of equal distribution of fluid flows between channels is accepted. This restriction leads to equalization of liquid temperatures in each channel. Taking into account the geometric arrangement of the channels, the excess of the final temperature of the heating and heated coolant in the first and last channels with respect to known data is up to 10%. The results of the study confirm the hypothesis of uneven heating of the coolant along the length of the plate package due to the uneven flow distribution between the channels.*

**Conclusion.** *The results of analytical calculation and modeling in the SolidWorks environment of the temperature regime in the channels of a plate-type heat exchanger indicate a significant influence of the geometric arrangement on the thermal regime in the channels. The formulated provisions of the mathematical description of the unevenness*

of the thermal regime of heat exchange channels, taking into account the location of the plates, are recommended to be used when improving the design parameters of plate-type heat exchangers.

**Keywords:** energy efficiency; plate heat exchangers; heat-hydraulic; heat exchange surface; flow distribution; numerical studies.

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

**Financing:** The research was carried out within the framework of the Grant of the President of the Russian Federation for the leading scientific school No. NSH-25.2022.4 using the equipment of the High Technology Center of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

**For citation:** Elistratova Y. V., Seminenko A. S., Uvarov V. A., Minko V. A. Thermal Condition in the Channels of Plate Heat Exchangers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 22-38 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-22-38>.

Received 10.08.2022

Accepted 03.10.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

## Введение

Системы теплоснабжения РФ являются самыми масштабными во всем мире и по большей части функционируют на принципах централизованного производства тепловой энергии, использование которой осуществляется за счет распределительных узлов [1-4]. Повышение технико-экономических показателей работы сети теплоснабжения осуществляется за счет реконструкции оборудования и отдельных участков, проведения теплоизоляционных работ, мероприятий по обеспечению учета потребления тепла, устройство теплообменных аппаратов и т.д. [5-7].

На основании ФЗ № 190-ФЗ от 27 июля 2010 г. «О теплоснабжении» эксплуатацию систем горячего водоснабжения всех объектов нового строительства необходимо осуществлять по закрытой схеме. Такое ограничение предвещает увеличение общей доли применения водонагревателей в области теплоснабжения.

Наиболее востребованными теплообменными аппаратами, используемыми в сфере теплоснабжения, являются кожухотрубные и пластинчатые теплообменники [6-9]. Преимущественное использование именно пластинчатого теплообменного оборудования по отношению к кожухотрубному объясняется компактностью их конструкции (по габаритным размерам) и высокой тепловой эффективностью [10,11]. В то же время относительно близкий уровень востребованности кожухотрубных теплообменников [7,10,11,12], формирует понимание того, что пластинчатые теплообменные аппараты далеко несовершенны в своем исполнении и требуют дополнительного улучшения собственных эксплуатационных характеристик [13-15].

Снижение энергоёмкости энергетического комплекса является актуальным направлением в развитии области теплоснабжения [16-21], поэтому актуальность исследований, направленных на повышение энергетической эффектив-

ности пластинчатых теплообменных аппаратов не вызывает сомнений.

Наличие широкой номенклатуры пластинчатых аппаратов, представляемой фирмами-изготовителями, затрудняет проведение исследований по изучению теплообменных процессов и поиска решений в совершенствовании конструкций оборудования. Это обусловлено отсутствием зависимостей, описывающих тепловой и гидравлический режим в явной форме.

Поэтому проведение оптимизационных расчетов на основании математического описания теплового и гидравлического режимов в каналах теплообменного аппарата имеет множество допущений, что снижает степень валидности расчетной модели<sup>1</sup> [22].

Общепринятая методика расчета пластинчатых теплообменников [23], основана на положениях теплового баланса и уравнении теплопередачи. Теплогидродинамические процессы пластинчатых теплообменников описываются эмпирическими уравнениями подобия. Ключевым допущением в расчетах является пренебрежение неравномерностью расходов теплоносителей в транзитных коллекторах по отдельным каналам, что теоретически уравнивает гидравлические условия и формирование температурного режима по длине пластинчатого пакета.

В работе [9] использован метод характеристик сопротивления для расчета гидродинамических условий распределения потоков жидкости в теплообменном аппарате. Результаты расчетов позволили определить зависимость распределения потоков жидкости между каналами в аппарате, учитывая взаимное расположение. Итоги исследования доказывают влияние конструктивных особенностей аппарата на распределение расходов жидкости между каналами, что в свою очередь предполагает различный температурный режим по длине пакета пластин.

Цель работы: Уточнить методику расчета пластинчатых теплообменных аппаратов, исключая равенство тепловых и гидравлических условий из общепринятых допущений.

Гипотеза. Процесс теплообмена в пластинчатом теплообменном аппарате зависит от условий распределения потоков жидкости между каналами.

Задачи:

- определить влияние геометрического расположения рабочего канала в конструктивном пространстве теплообменного аппарата на выходную температуру теплоносителя на выходе из канала;
- разработать алгоритм расчета температурного режима пластинчатого теплообменного аппарата, с учетом распределения потоков жидкости по длине пакета пластин;
- провести численные исследования теплового режима теплообменного аппарата пластинчатого типа.

---

<sup>1</sup> Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04. М., 2009. 180 с.

Приняты следующие допущения: тепловые потери в окружающую среду и фазовые переходы отсутствуют.

### Материалы и методы

Температуры жидкости в выходных патрубках теплообменника  $t_2''$  и  $t_x''$  по греющему и нагреваемому контуру соответственно определяются исходя из закона сохранения масс. Нижние индексы « $i$ » и « $j$ » присваиваются конкретному параметру, с указанием принадлежности к контуру нагрева по каналам: « $i$ » - греющий, « $j$ » - нагреваемый контур; верхние индексы «'» и «''» характеризуют входные и выходные значения рассматриваемого параметра соответственно; нижние индексы « $z$ » и « $x$ » характеризуют параметры на входе и выходе из теплообменного аппарата.

$$t_2'' = \frac{\sum (G_i) \cdot (t_i'')}{G_z'} = \frac{W_i \cdot t_i''}{W_z}, \quad (1)$$

$$t_x'' = \frac{\sum (G_j) \cdot (t_j'')}{G_x'} = \frac{W_j \cdot t_j''}{W_x}, \quad (2)$$

где  $G_i$  – массовый расход теплоносителя, кг/ч;  $W$  – водяной эквивалент рабочей жидкости, Дж/с·°C;  $t$  – температура теплоносителя, °C.

Условие равенства переданного тепла «горячим» теплоносителем  $Q_z$  и принятого «холодным»  $Q_x$  в условиях геометрического пространства пластинчатого теплообменника представим в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} Q = \sum (Q_n) \\ Q_x = \sum (Q_{xj}) \\ Q_z = \sum (Q_{zi}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $n$  – номер пластины от входа теплоносителя в распределительный коллектор;  $Q_n$  – тепло, переданное через  $n$  – ую пластину, Вт;  $Q_{xj}$  – количество тепла, полученное в  $j$ -ом канале по «холодному» контуру, Вт;  $Q_{zi}$  – количество тепла, переданное греющей жидкостью в  $i$ -ом канале, Вт.

Таким образом процесс теплопередачи в пластинчатом теплообменнике обуславливается суммой тепловых потоков через пластины. Представим условие передачи теплоты греющим теплоносителем в аппарате, с допущением адиабатности с окружающей средой (пренебрегается теплообмен через крайние пластины):

$$Q = \sum_{n=2}^{N_{nl}-1} Q_n, \quad (4)$$

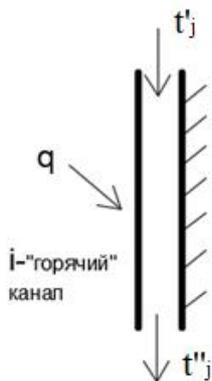
$$Q_n = K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n, \quad (5)$$

где  $N_{nl}$  – общее число пластин;  $\Delta t_n$  – среднелогарифмическая разность температур между теплоносителями, разделенными соответствующей пластиной, °C [23].

Коэффициенты теплоотдачи определяются исходя из уравнений подобия, с учетом комплексных геометрических характеристик теплообменного аппарата<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04. М., 2009. 180 с.

На рис. 1 представлены условия теплообмена для крайнего канала в случае его заполнения нагреваемым теплоносителем.



**Рис. 1.** Принципиальная схема передачи тепла для крайних каналов

**Fig. 1.** Schematic diagram of heat transfer for extreme channels

Согласно представленной схеме (рис. 1) преобразование температуры в крайнем канале  $\Delta t_{jk}$  описывается уравнением:

$$q = c \cdot G_{jk} \cdot (t''_{jk} - t'_{jk}) = W_{jk} \cdot \Delta t_{jk}, \quad (6)$$

где  $c$  – средняя теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C); нижний индекс «к» характеризует значение параметра для условий «крайнего» канала, совмещенного с прижимной или неподвижной плитой по конструкции теплообменника.

Тогда по зависимости (5), уравнение теплового баланса для крайних каналов (с учетом адиабатных условий) имеет вид

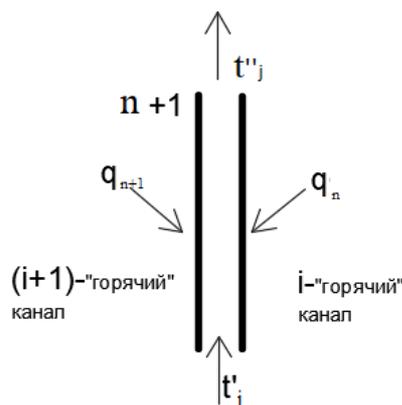
$$K_{нк} \cdot F_{нк} \cdot \Delta t_{нк} = W_{jk} \cdot \Delta t_{jk}. \quad (7)$$

Если по крайнему каналу циркулирует греющий теплоноситель, то меняется направление теплового потока по отношению к рис. 1. Тогда уравнение (7) для этого условия имеет вид:

$$W_{кк} \cdot \Delta t_{кк} = K_{нк} \cdot F_{нк} \cdot \Delta t_{нк}, \quad (8)$$

где индекс «кк» характеризует параметр для крайнего греющего канала, а «нк» характеризует условия теплопередачи через пластины под номерами 2 и  $n-1$ .

На рис. 2 представлен принцип подвода теплоты к нагреваемому каналу, положение которого в геометрическом пространстве аппарата определяется как промежуточное (не крайний канал). При этом учитывается величина тепловых потоков от граничащих «горячих» каналов.



**Рис. 2.** Принцип подвода тепла от греющих каналов к промежуточному нагреваемому каналу

**Fig. 2.** The principle of heat supply from hot channels to the intermediate heated channel

Согласно рис. 2 уравнение теплового баланса для «холодного» канала, ограниченного пластинами  $n$  и  $(n+1)$ , примет вид:

$$q_j = q_n + q_{n+1} = c \cdot G_j \cdot \Delta t_j \quad (9)$$

или

$$q_j = q_n + q_{n+1} = W_j \cdot \Delta t_j, \quad (10)$$

где

$$q_n = K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n, \quad (11)$$

$$q_{n+1} = K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1}. \quad (12)$$

Перепад температур нагреваемой жидкости на входе и выходе из канала  $\Delta t_j$ , °C:

$$\Delta t_j = t_j'' - t_j'. \quad (13)$$

Тогда уравнение теплового баланса для промежуточного канала, заполненного нагреваемым теплоносителем (геометрическое положение между пластинами  $n$  и  $(n+1)$ ), имеет вид:

$$K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1} = W_j \cdot \Delta t_j, \quad (14)$$

а уравнение теплового баланса для промежуточного канала, заполненного греющим теплоносителем (геометрическое положение между пластинами  $n$  и  $(n+1)$ ):

$$K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1} = W_i \cdot \Delta t_i. \quad (15)$$

Перепад температур греющей жидкости на входе и выходе из канала  $\Delta t_i$ , °C:

$$\Delta t_i = t_i' - t_i''. \quad (16)$$

Для определения температур жидкости на выходе из каждого канала, с учетом взаимного расположения пластин, разделяющих потоки греющего и нагреваемого теплоносителей необходимо решить систему уравнений теплового баланса для условий каждого канала:

$$\left. \begin{aligned} W_1 \cdot \Delta t_{k1} &= K_{n2} \cdot F_{n2} \cdot \Delta t_{n2}, \\ W_j \cdot \Delta t_j &= K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1}, \\ W_i \cdot \Delta t_i &= K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_n + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{n+1}, \\ W_k \cdot \Delta t_k &= K_{n,n-1} \cdot F_{n,n-1} \cdot \Delta t_{n,n-1}, \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где нижний индекс формируется на основании номера пластины  $n$  и соответственно может принимать значения от 1 до  $(N - 1)$  ( $N$  – общее число пластин в теплообменном аппарате);  $\Delta t_k$  – раз-

ность температур жидкости в последнем канале.

К заданным параметрам следует отнести: площадь поверхности пластины, коэффициент теплопередачи, теплоемкость жидкости, температуры «горячего» и «холодного» теплоносителя на входе в теплообменный аппарат, расход жидкости по греющему и нагреваемому контуру.

Так как сложность расчета теплового режима в каждом канале пластинчатого теплообменного аппарата обусловлена необходимостью учета индивидуальных условий процесса теплообмена, зависящих от геометрического расположения каналов, то целесообразно представить алгоритм расчета в виде подпрограмм.

На рис. 3 представлен этап расчета изменения температуры теплоносителя в каждом канале. Температуры  $t_1$  и  $t_2$  задаются в соответствии с нумерацией каналов от неподвижной плиты в конструкции теплообменника. Соблюдается следующее условие: если первый канал заполнен греющим теплоносителем, то всем последующим каналам, по которым циркулирует «горячий» теплоноситель, присваивается нечетная нумерация.

На рис. 4 представлен этап расчета изменения температур рабочей пластины, через которую осуществляется процесс теплопередачи. Разность температур определяется как среднелогарифмическое значение [23]. Схема движения прямоходов. Алгоритм корректируется при изменении характера движения теплоносителей относительно друг друга.

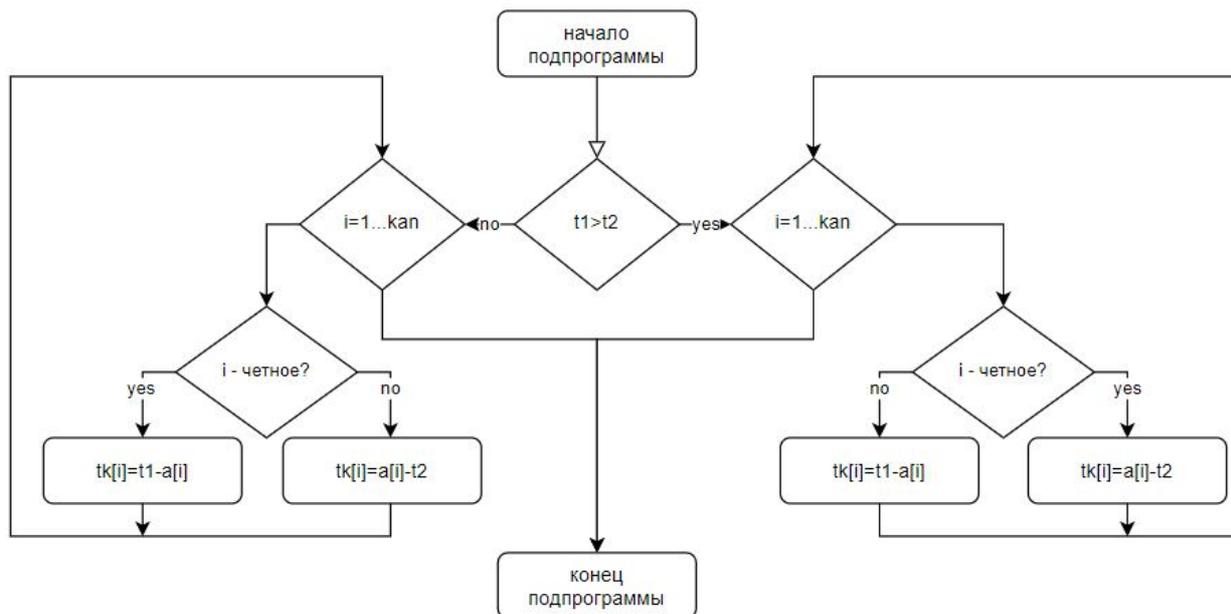


Рис. 3. Алгоритм расчета изменения температуры жидкости в канале

Fig. 3. Algorithm for calculating the temperature change of the liquid in the channel

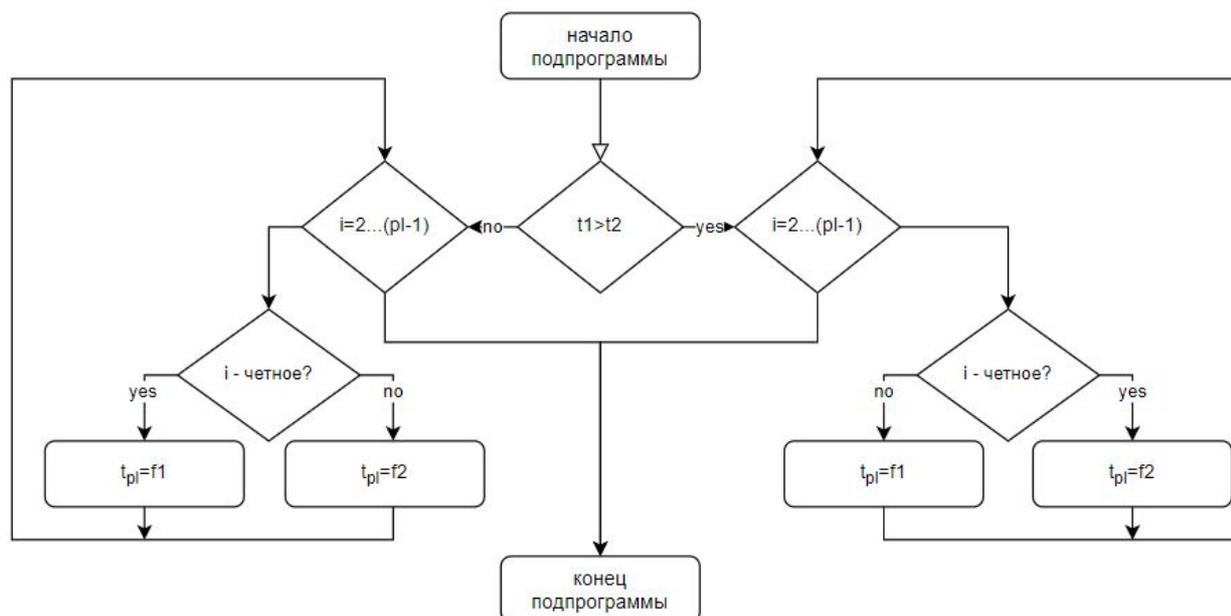
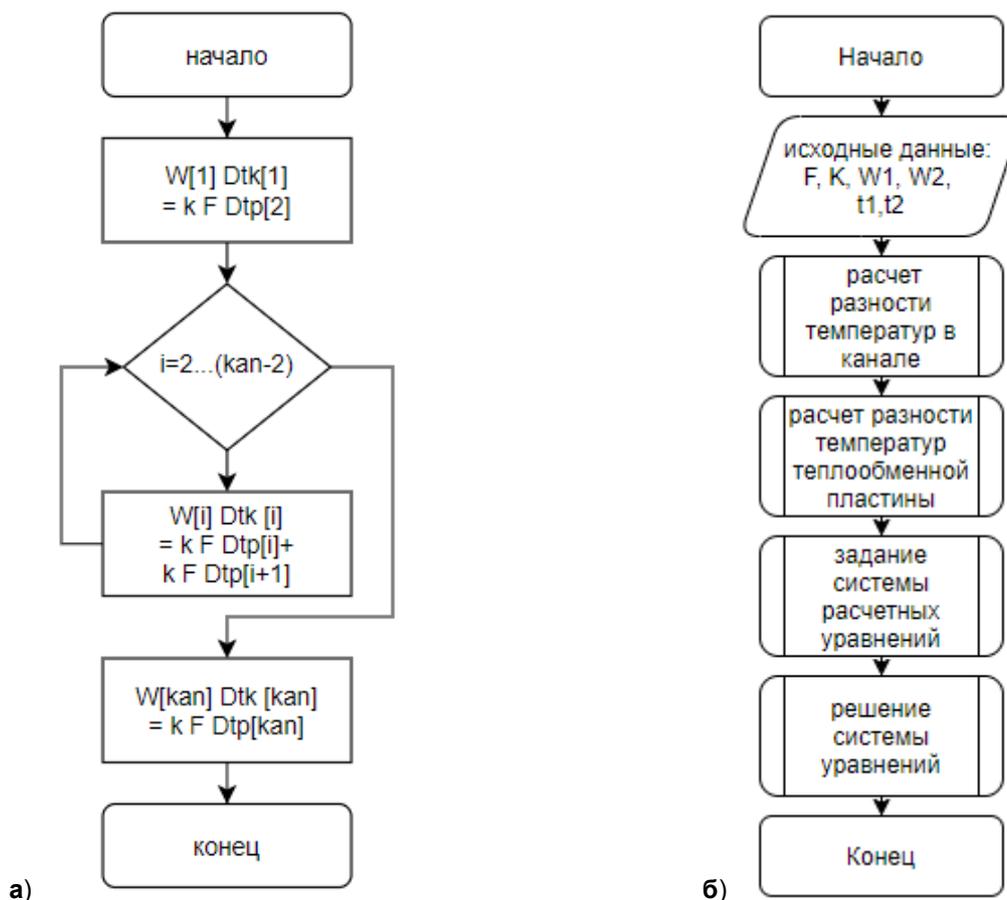


Рис. 4. Последовательность расчета изменения температур теплообменной пластины

Fig. 4. The sequence of calculation of temperature changes of the heat exchange plate

На рис. 5 (а) представлен алгоритм подпрограммы, которая подразумевает задание системы уравнений теплового баланса для каждого канала (17), количество уравнений будет определяться

числом теплообменных каналов. Далее (рис. 5 (б)) предлагается общий алгоритм расчета температурного режима пластинчатого теплообменника.



**Рис. 5.** Блок-схемы: **а** – задание системы уравнений теплового баланса для каждого канала; **б** – расчет теплового режима теплообменного аппарата пластинчатого типа

**Fig. 5.** Flowcharts: **a** – setting the system of heat balance equations for each channel; **b** – calculation of the thermal regime of a plate-type heat exchanger

Далее представленный алгоритм расчета теплового режима пластинчатого теплообменного оборудования необходимо дополнить условиями потокораспределения в аппарате. Основные результаты исследования особенностей неравномерности расходов жидкости в каналах, в зависимости от конструктивных особенностей теплообменника представлены в исследовании<sup>1</sup>. Принимаем условия геометрического расположения каналов для

<sup>1</sup> Елистратова Ю.В. Повышение эффективности пластинчатых теплообменных устройств в системах теплоснабжения: дис. ... кан. техн. наук.: 05.23.03. Белгород, 2021. 174 с.

расчета гидравлических условий в каналах теплообмена, образованных пластинами (рис. 6 (б)). Алгоритм расчета общего гидродинамического режима теплообменного аппарата пластинчатого типа представлен на рис. 6 (б).

Результаты получены для пластинчатого теплообменника с общим числом пластин – 12, площадь поверхности одной пластины 0,15 м<sup>2</sup>. Значения температур греющего и нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменный аппарат составляют 95 и 5 °С соответственно.

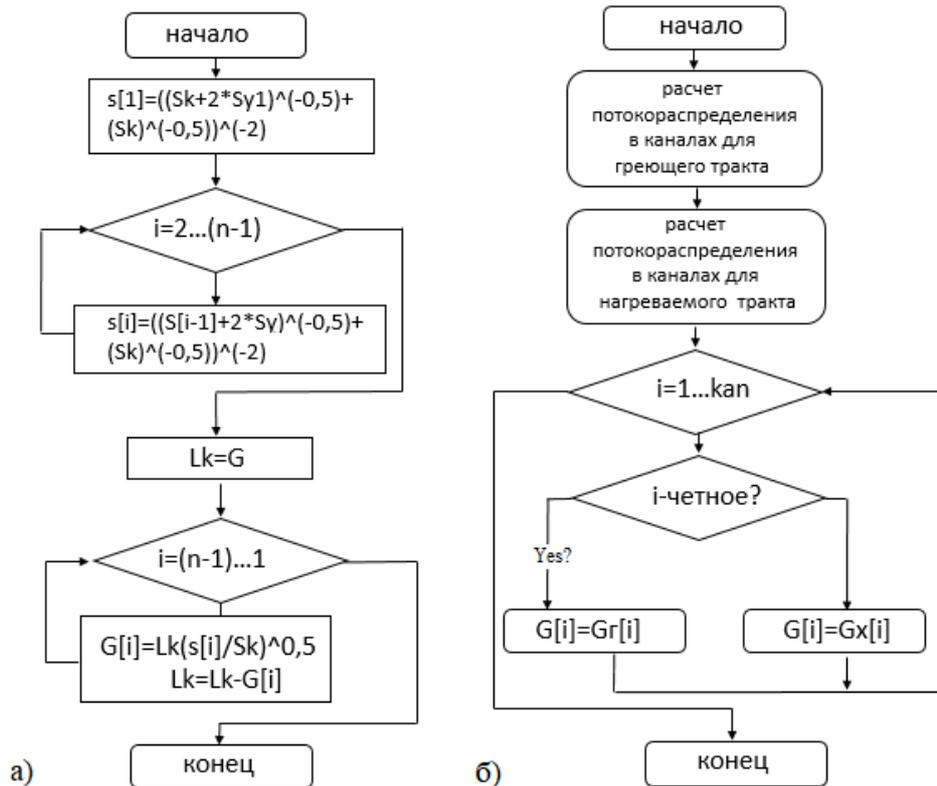


Рис. 6. Подпрограммы: а – расчета расходов жидкости в каналах теплообмена; б – гидродинамического режима в пластинчатом теплообменнике

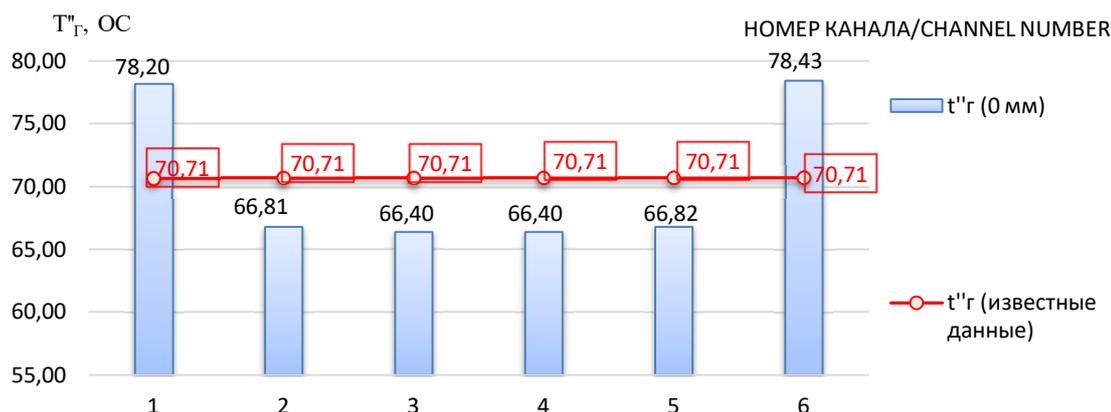
Fig. 6. Subprograms: а – calculation of fluid flow rates in heat exchange channels; б – hydrodynamic regime in a plate heat exchanger

Принято условие заполнения крайних каналов греющей жидкостью, при этом отсчет номера пластин и каналов осуществляется от неподвижной плиты в конструкции теплообменника.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 7 представлено сравнение температур теплоносителя на выходе из каналов греющего контура, полученных при решении системы уравнения теплового баланса для каждого канала (17) с учетом гидравлических условий распределения потоков жидкости по длине пакета пластин и по известной методике расчета теплового режима пластинчатых теплообменников [20].

Наблюдается превышение температуры греющего теплоносителя на выходе из первого и последнего каналов по отношению к промежуточным каналам и к результатам, полученным согласно известным данным. Применение классического описания температурного режима теплообменника приводит к равенству тепловых условий в пределах одной группы каналов. Отмечается незначительное расхождение температур жидкости между внутренними каналами – объясняется относительно малым количеством пластин, принятым для упрощения расчета, что в свою очередь снизило критичность расхождения расходов между ними.

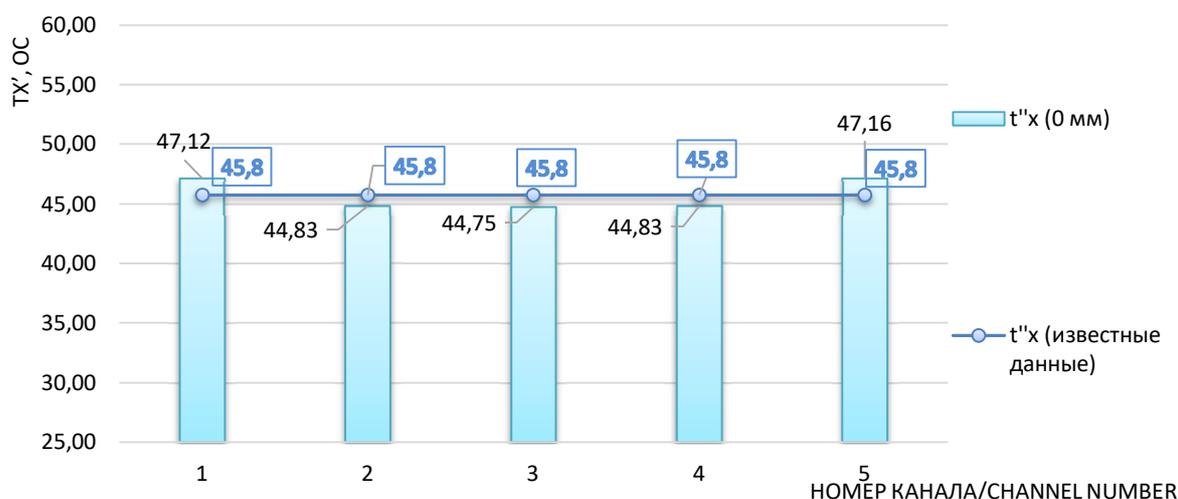


**Рис. 7.** Распределение температур теплоносителя на выходе из каналов по «горячему» контуру

**Fig. 7.** Distribution of coolant temperatures at the outlet of the channels along the "hot" circuit

Температурный режим каналов теплообменника в условиях «чистой» теплообменной поверхности (не учитываются сопутствующие загрязнения в ходе эксплуатации теплообменника) представляет некоторую симметричность расчетных

температур нагреваемого теплоносителя на выходе из каналов (рис. 8). При этом температуры в крайних каналах выше среднего значения на 5%, а максимальное расхождение температур теплоносителя по греющему контуру составляет 12 оС.



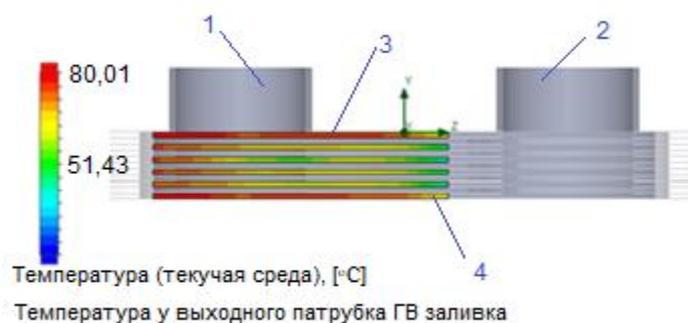
**Рис. 8.** Распределение температур теплоносителя на выходе из каналов по «холодному» контуру

**Fig. 8.** Distribution of coolant temperatures at the outlet of the channels along the "cold" circuit

На рис. 9 наглядно представлено различие температурного режима на выходе из каналов теплообменника по греющей стороне. Результаты получены в программном комплексе SolidWorks, для описание турбулентного течения

принята стандартная математическая k-ε модель<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04. М., 2009. 180 с.



**Рис. 9.** Температурное поле на выходе из каналов по «горячему» контуру: **1** – входной патрубок «горячего» контура; **2** – выходной патрубок «холодного» контура; **3** – первый канал по «горячему» контуру; **4** – последний канал теплообмена по «горячему» контуру

**Fig. 9.** Temperature field at the outlet of the channels along the "hot" circuit: **1** – the inlet pipe of the "hot" circuit; **2** – the outlet pipe of the "cold" circuit; **3** – the first channel along the "hot" circuit; **4** – the last channel of heat exchange along the "hot" circuit

Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что процесс теплообмена в пластинчатом теплообменнике зависит от условий распределения потоков жидкости между каналами, с учетом их пространственного расположения в конструкции аппарата.

### Выводы

Результаты аналитического расчета и моделирования в среде SolidWorks температурного режима в каналах пластинчатых теплообменников свидетельствуют о существенном влиянии геометрическо-

го расположения на тепловой режим в каналах. Полученные результаты оспаривают общепринятые допущения о равенстве температур в каналах теплообмена по длине пакета пластин. Следовательно, исключение допущения о равенстве теплового режима между каналами пластинчатого теплообменника позволит проводить валидатные исследования по разработке интенсифицированных поверхностей теплообмена и совершенствованию конструктивных параметров теплообменного аппарата в целом.

### Список литературы

1. Рыбкина Г.В., Яблокова А.А. Современное состояние теплоснабжения и его развитие // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2. С. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99.
2. Осипов Д.А., Журавлева Н.В. Основные элементы тепломеханических схем теплогенерирующих объектов // Вестник магистратуры. 2021. №2-1 (113). С. 26-28.
3. Гонина Е.С. Расчёт индивидуального теплового пункта // Вестник магистратуры. 2021. №1-5 (112). С. 121-125.

4. Свинцов А.П., Андросов Е. А. Эксплуатационная надежность оборудования в индивидуальных тепловых пунктах // *Жилищное строительство*. 2019. №12. С. 45-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-45-51>.
5. Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А. Актуальность моделей загрязнения для диагностики состояния пластинчатых теплообменников // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 10. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40.
6. Нияковский А. М., Сидорова А. Ю., Нияковский А. А. Особенности подбора пластинчатых теплообменников горячего водоснабжения в модернизируемых тепловых пунктах жилых зданий // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2018. № 8. С. 158-164.
7. Современные способы интенсификации работы кожухотрубных теплообменных аппаратов систем теплоснабжения / Л.А. Куцев, Н.Ю. Никулин, Ю.Г. Овсянников, А.И. Алифанова // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. № 2 (25). С. 130-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-130-140>.
8. Хабибулин А.В. Виды теплообменных устройств. использование теплообменников в автономном энергоснабжении // *Инновационная наука*. 2021. №1. С. 36-37.
9. Особенности распределения потоков жидкости в пластинчатых теплообменниках / Ю.В. Елистратова, А.С. Семиненко, В.А. Минко, Р.С. Рамазанов // *Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова*. 2020. № 12. С. 47-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55.
10. Елистратова Ю.В., Мацукова М.Н. Перспективы стабилизационной обработки теплоносителя теплообменных аппаратов методами физического воздействия // *Россия молодая: сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / редкол.: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]*. Кемерово, 2022. С. 21207.1-21207.6.
11. Кондрашов Н.П., Лагуткин М.Г. Повышение эффективности процесса теплопередачи пластинчато-ребристого теплообменника // *Евразийский Союз Ученых*. 2019. №3-4 (60). С. 6-13.
12. Повышение интенсификации теплообмена в кожухотрубных теплообменниках / П.Н. Кузнецов, К.А. Миндров, А.А. Кузнецов, И.Ю. Бекшаев, А.А. Инчин, А.В. Охотников, С.В. Чугунов // *ИВД*. 2022. №6 (90). С. 680-688.
13. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения / Н.В. Рыдалина, Б.Г. Аксенов, О.А. Степанов, Е.О. Антонова // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2020. № 3. С. 3-13. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.
14. Khavin G., Babak T. The benefits of using channels with different corrugation heights in plate heat exchangers // *East European Advanced Technology Journal*, 2018, vol. 1, no. 8 (91), pp. 33-38. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4\_47.
15. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. Влияние расходов теплоносителей на параметр теплообменника при переменных режимах его работы // *Вестник МГСУ*. 2019. №5 (128). С. 621-623. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621-633.

16. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №5. С. 70-81. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.

17. Буланин В.А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2019. № 9. С. 54-62. DOI: 10.34031/article\_5da452a45dbf30.07663447.

18. Стенников В.А., Пеньковский А.В. Проблемы российского теплоснабжения и пути их решения // ЭКО. 2019. №9 (543). С. 48-69. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2019-9-48-69.

19. Семикашев В.В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. 2019. № 9 (543). С. 23-47. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2019-9-23-47

20. Status of 4th generation district heating: Research and results / H. Lund, P.A. Stergaard, M. Chang, S. Werner, S. Svendsen et al. // Energy. 2018. Vol.164. P. 147–154. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.

21. Fukang Ren, Ziqing Wei, Xiaoqiang Zhai. A review on the integration and optimization of distributed energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 162, 2022, 112440, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>.

22. Выбор определяющих параметров технического состояния, оказывающих влияние на остаточный срок службы теплообменного оборудования / П.А. Кулаков, А.В. Рубцов, В.Г. Афанасенко, О.Е. Зубкова [и др.] // Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta Inzhiniring Georesursov. 2020. С. 97-105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451.

23. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1969. 560 с.

## References

1. Rybkina G.V., Yablokova A.A. Sovremennoye sostoyaniye teplosnabzheniya i yego razvitiye [Modern state of heat supply and its development]. *Promyshlennyye protsessy i tekhnologii = Industrial Processes and Technologies*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99.

2. Osipov D.A., Zhuravleva N.V. Osnovnyye elementy teplomekhanicheskikh skhem teplogeneriruyushchikh ob"yektov [The main elements of thermal mechanical schemes of heat generating objects]. *Vestnik magistratury = Bulletin of the Magistracy*, 2021, no. 2-1 (113), pp. 26-28.

3. Gogina Ye.S. Raschot individual'nogo teplovogo punkta [Calculation of an individual heat point. Bulletin of the Magistracy]. *Vestnik magistratury = Bulletin of the Magistracy*, 2021, no. 1-5 (112), pp. 121-125.

4. Svintsov A.P., Androsov Ye. A. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' oborudovaniya v individual'nykh teplovykh punktakh [Operational reliability of equipment in individual heating

points]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo = Housing Construction*, 2019, no. 12, pp. 45-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-45-51>.

5. Elistratova YU.V., Seminenko A.S., Minko V.A. Aktual'nost' modeley zagryazneniya dlya diagnostiki sostoyaniya plastinchatykh teploobmennikov [The relevance of pollution models for diagnosing the state of plate heat exchangers]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU im. V.G. Shukhov*, 2020, no. 10, pp. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40.

6. Niyakovskiy A.M., Sidorova A.YU., Niyakovskiy A.A. Osobennosti podbora plastinchatykh teploobmennikov goryachego vodosnabzheniya v moderniziruyemykh teplovykh punktakh zhilykh zdaniy [Features of the selection of plate heat exchangers for hot water supply in modernized heating units of residential buildings]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki = Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science*, 2018, no. 8, pp. 158-164.

7. Kushchev L.A., Nikulin N.YU., Ovsyannikov Yu.G., Alifanova A.I. Sovremennyye sposoby intensivatsii raboty kozhukhotrubnykh teploobmennikh apparatov sistem teplosnabzheniya [Modern methods of intensification of the operation of shell-and-tube heat exchangers of heat supply systems.]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Izvestiya Vuzov. Investments. Building. Real Estate*, 2018, no. 2 (25), pp. 130-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-130-140>.

8. Khabibulin A.V. Vidy teploobmennikh ustroystv. ispol'zovaniye teploobmennikov v avtonomnom energosnabzhenii [Types of heat exchange devices. use of heat exchangers in autonomous power supply]. *Innovatsionnaya nauka = Innovative Science*, 2021, no. 1, pp. 36-37.

9. Elistratova YU.V., Seminenko A.S., Minko V.A., Ramazanov R.S. Osobennosti raspredeleniya potokov zhidkosti v plastinchatykh teploobmennikakh [Features of the distribution of fluid flows in plate heat exchangers]. *Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2020, no. 12, pp. 47-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55.

10. Elistratova Yu.V., Matsukova M.N. [Prospects for the stabilization treatment of the coolant of heat exchangers by methods of physical impact]. *Rossiya molodaya. Sbornik materialov XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Russia is young. Collection of materials of the XIV All-Russian scientific-practical conference with international participation]; ed by K.S. Kostikov. Kemerovo, 2022, pp. 21207.1-21207.6. (In Russ.).

11. Kondrashov N.P., Lagutkin M.G. Povysheniye effektivnosti protsessa teploperedachi plastinchato-rebristogo teploobmennika [Improving the efficiency of the heat transfer process of a plate-fin heat exchanger]. *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*, 2019, no. 3-4 (60), pp. 6-13.

12. Kuznetsov P.N., Mindrov K.A., Kuznetsov A.A., Bekshayev I.YU., Inchin A.A., Okhotnikov A.V., Chugunov S.V. Povysheniye intensivatsii teploobmena v kozhukhotrubnykh teploobmennikakh [Increasing the intensification of heat transfer in shell-and-tube heat exchangers]. *IVD*, 2022, no. 6 (90), pp. 680-688.

13. Rydalina N.V., Aksenov B.G., Stepanov O.A., Antonova Ye.O. Primeneniye poristykh materialov v teploobmennikakh apparatakh sistemy teplosnabzheniya [The use of porous materials in heat exchangers of the heat supply system. *Izvestiya vuzov*]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki = Izvestiya Vuzov. Energy Problems*, 2020, no. 3, pp. 3-13. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.

14. Khavin G., Babak T. The benefits of using channels with different corrugation heights in plate heat exchangers. *East European Advanced Technology Journal*, 2018, vol. 1, no. 8 (91), pp. 33-38. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4\_47.

15. Rafal'skaya T.A., Rudyak V.Ya. Vliyaniye raskhodov teplonositeley na parametr teploobmennika pri peremennykh rezhimakh yego raboty [Influence of coolant costs on the parameter of a heat exchanger under variable modes of its operation]. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*, 2019, no. 5 (128), pp. 621-623. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621-633.

16. Kikot' Ye. A., Gazizov F.N. Vybory struktury teplovoy generatsii v gorodakh RF pri aktualizatsii skhem teplosnabzheniya [The choice of the structure of thermal generation in the cities of the Russian Federation when updating heat supply schemes]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki = Izvestiya Universities. Energy Problems*, 2020, no. 5, pp. 70-8. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.

17. Bulanin V.A. Algoritm analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya [Algorithm for analyzing the energy efficiency of a heat supply source]. *Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2019, no. 9, pp. 54-62. DOI: 10.34031/article\_5da452a45dbf30.07663447.

18. Stennikov V.A., Pen'kovskiy A.V. Problemy rossiyskogo teplosnabzheniya i puti ikh resheniya [Problems of Russian heat supply and ways to solve them]. *EKO*, 2019, no. 9 (543), pp. 48-69. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-48-69.

19. Semikashev V.V. Teplosnabzheniye v Rossii: tekushchaya situatsiya i problemy investitsionnogo razvitiya [Heat supply in Russia: current situation and problems of investment development]. *EKO*, 2019, no. 9 (543), pp. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47.

20. Lund H., Stergaard P.A., Chang M., Werner S., Svendsen S. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 2018, vol. 164, pp. 147-154. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.

21. Fukang Ren, Ziqing Wei, Xiaoqiang Zhai. A review on the integration and optimization of distributed energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 162, 112440, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>.

22. Kulakov P.A., Rubtsov A.V., Afanasenko V.G., Zubkova O.Ye. i dr. Vybory opredelyayushchikh parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya, okazyvayushchikh vliyaniye na

ostatochnyy srok sluzhby teploobmennogo oborudovaniya [The choice of the determining parameters of the technical condition that affect the residual service life of heat exchange equipment]. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta Inzining Georesursov = [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Engineering Georesources, 2020, pp. 97-105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451.*

23. Nashchokin V.V. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. Moscow, *Vysshaya shkola Publ.*, 1969, 560 p.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Елистратова Юлия Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [tg.v.info@mail.ru](mailto:tg.v.info@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1989-0632>

**Yulia V. Elistratova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [tg.v.info@mail.ru](mailto:tg.v.info@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1989-0632>

**Семиненко Артём Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [seminenko.as@gmail.com](mailto:seminenko.as@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0581-4391>

**Artem S. Seminenko**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [seminenko.as@gmail.com](mailto:seminenko.as@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0581-4391>

**Уваров Валерий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [isi@bstu.ru](mailto:isi@bstu.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

**Valery A. Uvarov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [isi@bstu.ru](mailto:isi@bstu.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

**Минко Всеволод Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [va.minko@gmail.com](mailto:va.minko@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

**Vsevolod A. Minko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [va.minko@gmail.com](mailto:va.minko@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3614-8536>

## Исследование свойств алгоритма поиска в ширину для нахождения маршрута передвижения роботов

С. Г. Емельянов<sup>1</sup>, М. В. Бобырь<sup>1</sup> ✉, А. Г. Крюков<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: [fregat\\_mn@rambler.ru](mailto:fregat_mn@rambler.ru)

### Резюме

**Цель исследования.** Представленное в данной статье исследование нацелено на повышение быстродействия поиска пути для маршрута передвижения роботов. Научной новизной является полученная закономерность отношения времени и размеров поля.

**Методы.** Для нахождения пути в лабиринте использовались алгоритмы поиска в глубину и поиска в ширину, основой которых является цикличное прохождение смежных не посещенных ранее вершин графа. Быстродействие оценивается в скорости выполнения программного кода на подготовленных образцах. Научная новизна была получена за счет исследования влияния размеров карты на быстродействие алгоритмов поиска в глубину и ширину.

**Результаты.** Разработана программная реализация алгоритмов поиска в ширину и в глубину. В статье подробнее представлено описание алгоритма поиска в ширину в виде псевдо- и программного кодов, которые основываются на цикле *while*, где осуществляется обработка очереди проверяемых вершин графа. На основе оценки быстродействия найденного пути сделан вывод, что поиск в ширину не является быстрым. На основе оценки влияния различных факторов на скорость работы алгоритма сделан вывод, что увеличение размеров поля, уменьшение количества препятствий и расстояния между стартовой и финальной точками увеличивает время выполнения алгоритма.

**Заключение.** Был представлен алгоритм поиска в ширину и его программная реализация. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что данный алгоритм по времени не является быстрым, но во всех тестах находил кратчайший путь. Также была получена закономерность  $t_a = f(w, h)$  для подготовленных образцов искомого поля, которая выражается в зависимости времени выполнения алгоритма от длины и ширины поля. И можем заключить, что он применим для поиска пути передвижения роботов так как всегда находит кратчайший путь.

---

**Ключевые слова:** быстродействие алгоритма; поиск в ширину; поиск в глубину; робот; граф.

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

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

**Для цитирования:** Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Крюков А. Г. Исследование свойств алгоритма поиска в ширину для нахождения маршрута передвижения роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56>.

Поступила в редакцию 17.08.2022

Подписана в печать 06.10.2022

Опубликована 14.10.2022

## Research of the Properties of the Breadth-First Search Algorithm for Finding the Movement Route of Robots

Sergei G. Emelianov <sup>1</sup>, Maxim V. Bobyr <sup>1</sup> ✉, Aleksander G. Kryukov <sup>1</sup>

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

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The research presented in this article is aimed at improving the speed of finding a path for the movement route of robots. The scientific novelty is the obtained correlation of time and field size.

**Methods.** To find the path in the maze, the depth-first search and breadth-first search algorithms were used, the basis of which is the cyclic processing of adjacent previously unvisited graph vertices. Performance is estimated in terms of the speed of program code execution on prepared samples. Scientific novelty was obtained by studying the influence of map sizes on the performance of depth-first and breadth-first search algorithms.

**Results.** A software implementation of breadth-first and depth-first search algorithms has been developed. The article provides a more detailed description of the breadth-first search algorithm in the form of pseudo and program codes, which are based on the while loop, where the queue of checked graph vertices is processed. Based on the evaluation of the speed of the found path, it was concluded that the breadth-first search is not the fastest. Based on the assessment of the influence of various factors on the speed of the algorithm, it was concluded that an increase in the size of the field, a decrease in the number of obstacles and a distance between the starting and final points increases the execution time of the algorithm.

**Conclusion.** The breadth-first search algorithm and its software implementation were presented. In the course of experimental studies, it was found that this algorithm is not the fastest in time, but in all tests, it found the shortest path. The correlation  $t_a = f(w, h)$  was also obtained for the prepared samples of the desired field, which is expressed as the dependence of the algorithm execution time on the length and width of the field. And we can conclude that it is applicable for finding the movement path of robots, since it always finds the shortest path.

**Keywords:** algorithm performance; breadth-first search; depth-first search; robot; graph.

**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 supported by the grant of the Russian Science Foundation 23-21-00071 – "Development of a computer vision model for intelligent navigation of robotic systems based on the construction of three-dimensional scenes from depth maps".

**For citation:** Emelianov S. G., Bobyr M. V., Kryukov A. G. Research of the Properties of the Breadth-First Search Algorithm for Finding the Movement Route of Robots. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 39-56 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56).

Received 17.08.2022

Accepted 06.10.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

## Введение

Роботы используются в различных сферах человеческой жизнедеятельности, от бытовых дел до сложных производственных задач. Например, таких как планирование пути и поиск оптимального (кратчайшего, требующего наименьших затрат ресурсов/времени). Они стали одними из основных направлений разработки в области навигации роботов [1].

Существуют различные решения данной задачи. Используется подгруппа мягких алгоритмов – эволюционные вычисления, а именно методы роя частиц, в основе которых лежит копирование поведения животных или насекомых, например муравьев в одноименном алгоритме. Недостатком базового подхода является локальная минима (local minima), в результате которого робот может застрять в бесконечном цикле пытаясь объехать препятствие. В работе [2] представлены улучшения алгоритма, решающие эту проблему. Также ее решили при помощи нечеткой логики в [3]. В [4] и [5] смогли уменьшить время вычисления и затраты энергии соответственно, используя цифровые карты высот. Есть пример комбинирования двух моделей поведения: кукушки и летучей мыши [6].

В машинном обучении (обучение с подкреплением) были представлены алгоритмы, которые позволили улучшить такие характеристики как стабильность и скорость работы “actor-critic” алгоритма благодаря добавлению мультипоточности в [7]; переиспользованию данных буфера из [8] в [9]; введению ограничения области доверия в [10-11]. В [8] была решена проблема влияния шума на вычисления функции полезности Q за счет добавления еще одной нейронной сети.

Также развиваются и традиционные алгоритмы. Например, в работе [12], авторы исследовали задачу предотвращения роботом столкновений, для навигации мобильного робота используется комбинация жадного алгоритма и улучшенного алгоритма поиска в ширину. В [13] улучшенная версия используется в комбинации с RFID метками. А в [14] поиск в ширину применяется в прямоугольной системе координат.

В данной работе описывается применение алгоритма поиска в ширину. Выбор был сделан на основе оценки преимуществ и недостатков над другими способами. Алгоритмы, основанные на машинном обучении, не рассматриваются, так как требуют дополнительных обширных знаний. Остаются традиционные алгоритмы, среди которых

выделяются алгоритмы обхода графа как одни из самых надежных (пусть будет найден, если он существует) и детерминированных [15-16]. К ним относятся алгоритм Дейкстры,  $A^*$ , поиск в ширину и поиск в глубину, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Они делятся на две подгруппы: информированные (алгоритм Дейкстры и  $A^*$ ) и неинформированные (поиск в ширину и глубину) методы поиска. Их отличие заключается в том, что для информированных методов требуется наличие знаний о конкретной задаче, для неинформированных это не нужно [17]. Следовательно, для работы в режиме реального времени в неизвестной среде подходит вторая подгруппа. Алгоритм поиска в ширину обладает такими преимуществами, как способность находить самый короткий путь, время выполнения алгоритма в сравнении с аналогами [18], а также вышеупомянутые. В алгоритме Дейкстры на каждой итерации рассчитывается наименьшее расстояние от робота до искомой точки и принимается движение о дальнейших передвижениях. Следовательно, если робот не видит точку, например из-за препятствия, то алгоритм Дейкстры работать не будет. Для  $A^*$  необходимо большее количество памяти робота, чем для поиска в ширину [18].

Помимо робототехники, алгоритм поиска в ширину часто используется для расчётов на графических чипах [19-20] и изучается возможность ускорения данного процесса за счёт оптимизации распа-

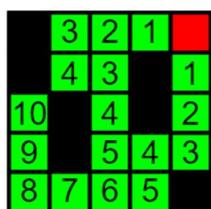
раллеливания вычислительной нагрузки [20-23].

### Материалы и методы

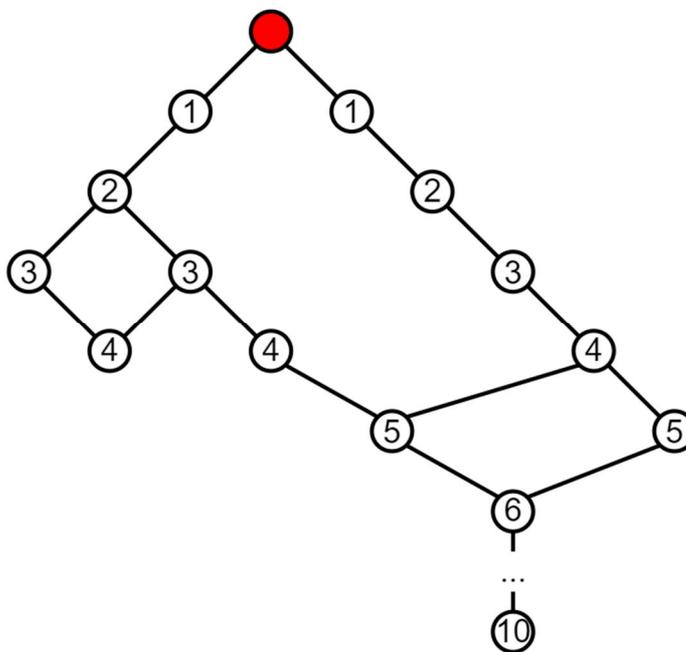
Для использования алгоритма поиска в ширину необходимо сперва представить карту в виде графа. Для этого существует несколько методов. Первый – это расставить вершины на заданном пространстве таким образом, чтобы они показывали места, в которых может находиться робот. Ребра, соединяющие вершины, являются путями возможного перемещения робота [16]. Такой способ применяется для прокладки маршрутов самолетов [24]. Второй метод, который используется в данной статье, основан на разбиении пространства на клетки [25-26] или иные геометрические фигуры, как например треугольники или шестигранники [16]. Реализация подобных алгоритмов реализуема при прогнозировании траектории режущего инструмента [27-29] или перемещения мобильного робота [30]. Второй способ был нами выбран, так как он обеспечивает автономную работу робота: человеку не нужно рисовать граф вручную на основе имеющейся карты. Зная начальную позицию, пролагаются возможные пути передвижения, из которых и формируется граф. Например, на рис. 1 (а) изображена карта случайной местности, разбитая на клетки разных цветов, где черным помечены непроходимые участки (препятствия), красным – начальная позиция, зеленым – клетки свободные для перемещения. На рис. 1

(б) изображено возможное представление той же самой карты в виде графа, подходящее для прохода алгоритма поиска в ширину. В данной работе рас-

считывается возможность хождения только в 4 направления: вправо, влево, вниз, вверх. Цифры отображают уровни прохода поиска в ширину.



а)



б)

**Рис. 1.** Карта местности, представленная в виде клеток (а), представление данной карты в виде графа (б)

**Fig. 1.** Map of the area, presented in the form of cells (а), representation of this map in the form of a graph (б)

Основная концепция работы алгоритма поиска в ширину заключается в том, что проход по вершинам графа осуществляется горизонтально/поуровнево, то есть сперва исследуются вершины на одном уровне. Например, на рис. 1 (а), сперва проверяются вершины «1», затем «2» и т.д. Порядок посещения вершин основывается на принципе FIFO, который применяется в очереди. Псевдокод алгоритма поиска в ширину представлен на рис. 2. Вначале создается очередь из вершин на обработку, начиная со стартовой. Она помечается

как посещенная. В данной работе это реализовано через дополнительный массив из посещенных вершин. Далее, пока очередь из верши не пуста, осуществляется проверка смежных вершин, той, которая только что была убрана из очереди. Смежные вершины проверяют, являются ли какая-то из них искомой вершиной или нет. Если является – алгоритм заканчивается и выдается путь до нужной точки, если нет – помечается как посещенная и добавляется в очередь для дальнейшего выполнения.

**Algorithm 2: Breadth-first search for robotic path in a maze**

Input: Nodes in the maze, Starting Point

BFS (G, s)

let Q be queue

Q.enqueue(s)

mark s as visited

while (Q is not empty)

v = Q.dequeue()

for all neighbours w of v in Graph G

if w is not visited

Q.enqueue(w)

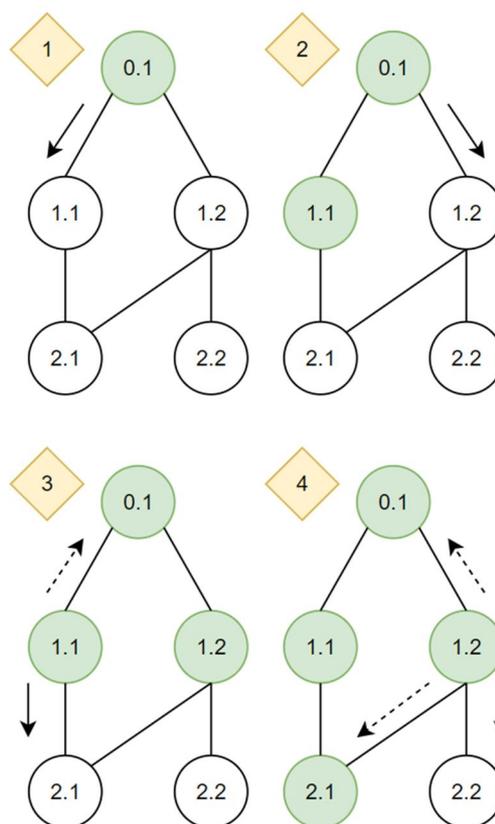
mark w as visited

Output: Robotic Path from Starting Point to Goal Point

**Рис. 2.** Псевдокод алгоритма поиска в ширину [18]**Fig. 2.** Breadth-first search algorithm pseudocode [18]

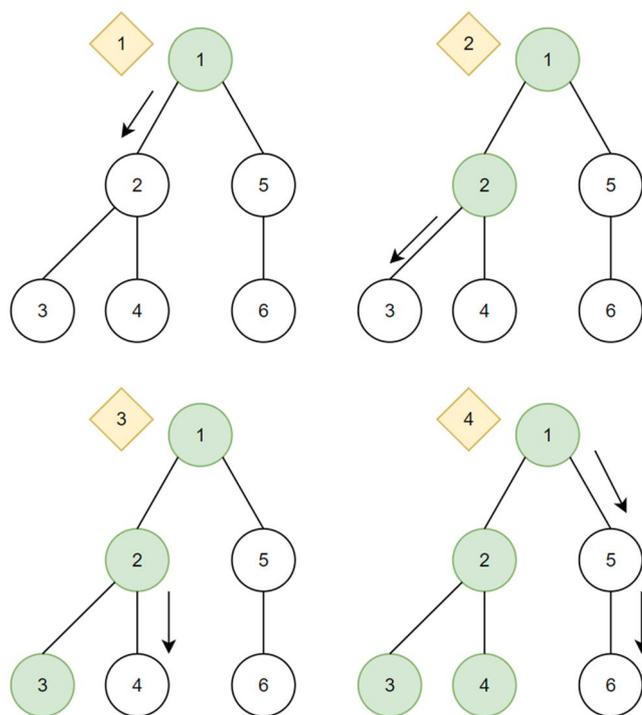
Пример прохода графа алгоритмом поиска в ширину представлен на рис. 3, где цифра перед точкой обозначает уровень поиска, цифра после – порядковый номер на данном уровне, следовательно последовательность проверки. Пунктирными стрелками помечены возможные пути прохода, которые, однако, не будут использованы из-за того, что данные вершины уже были посещены.

Для проведения сравнительного анализа был также использован алгоритм поиска в глубину. Его отличие от поиска в ширину заключается в том, что проход по вершинам графа осуществляется сперва в одном направлении по определенному пути. Если последняя вершина пути не является искомым точкой, то алгоритм возвращается назад до точки разветвления и обрабатывается другой путь.

**Рис. 3.** Пример работы алгоритма поиска в ширину**Fig. 3.** An example of the operation of the breadth-first search algorithm

Пример прохода графа алгоритмом поиска в глубину представлен на рис. 4, где цифра обозначает последовательность проверки. Шаг 4 представляет проход по всему правому пути сразу.

Реализация алгоритма поиска в ширину была осуществлена в виде комплекса программного обеспечения, реализованного в среде Microsoft Visual Studio 2019 на языке программирования C# и представлена на рис. 5 и рис. 6.



**Рис. 4.** Пример работы алгоритма поиска в глубину

**Fig. 4.** An example of the operation of the depth-first search algorithm

Примеры работы программного кода представлены на рис.7. В размер поля также включены его границы. То есть, поле, по которому можно передвигаться, на 2 меньше в высоту и ширину. Например, на рис.6 (а), размер которого 10 на 10 клеток, область передвижения размером 8 на 8 клеток.

На рис. 5 представлены основные использованные структуры данных и переменные. На рис. 6 представлен цикл while осуществляющий поиск в ширину. В случае успешного нахождения решения, цикл вернет последовательность направлений движения от начальной до искомой точки. В противном случае, будет возвращено сообщение “no path”.

Входные данные подаются в формате .txt файла, в котором каждый символ, включая пробелы, подразумевается, как клетка пространства, а при помощи специально условленных символов обозначаются необходимые элементы: стены и препятствия - #, а начальная позиция – А.

```
struct Brain {
    public int x;
    public int y;
    public string path; }

struct Place {
    public int x;
    public int y; }

Queue<Brain> queue = new Queue<Brain>();
List<Place> visited = new List<Place>();

Brain brain;
brain.x = start.x;
brain.y = start.y;
brain.path = "";

Place place;
queue.Enqueue(brain);
```

**Рис. 5.** Переменные и их инициализация для алгоритма поиска в ширину

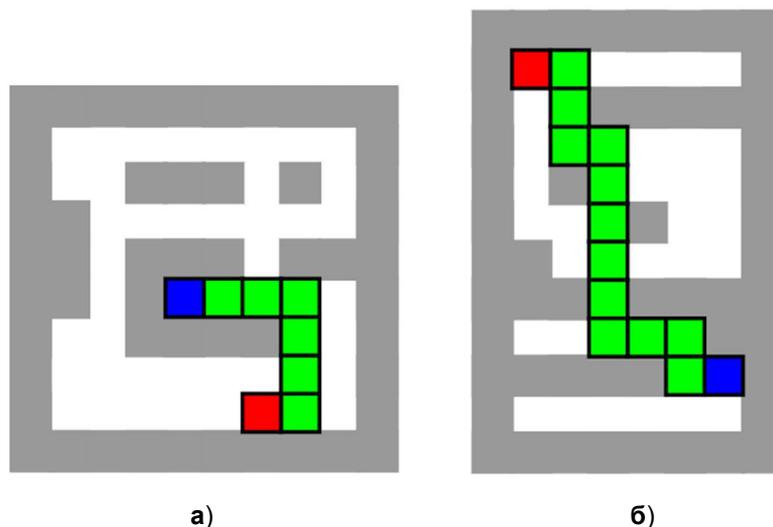
**Fig. 5.** Variables and their initialization for the breadth-first search algorithm

```
while (queue.Count > 0)
{
    brain = queue.Dequeue();
    foreach (Brain side in directions)
    {
        place.x = brain.x + side.x;
        place.y = brain.y + side.y;
        if (place.x < 0 || place.x >= w)
            continue;
        if (place.y < 0 || place.y >= h)
            continue;
        if (map[place.x, place.y] != ' ')
            continue;
        if (visited.Contains(place))
            continue;
        visited.Add(place);

        Brain step = new Brain(place, brain.path + side.path);
        if (place.Equals(finish))
            return step.path;
        queue.Enqueue(step);
    }
}
return "no path";
```

**Рис. 6.** Программная реализация алгоритма поиска в ширину

**Fig. 6.** Implementation of the breadth-first search algorithm



**Рис. 7.** Примеры работы поиска в ширину для нахождения пути на поле размером:  
**а** – 10 на 10 клеток; **б** – 8 на 12 клеток

**Fig. 7.** Breadth-first search examples for finding a path on a field of size:  
**a** – 10 by 10 cells; **b** – 8 by 12 cells

В примере слева была выведена следующая последовательность действий “R D D R D D D D R R D R”, а в примере справа: “R U U U L L L”, где U – вверх, L – влево, R – вправо, D – вниз.

### Результаты и их обсуждение

В ходе проведения эксперимента оценивались факторы выполнения алгоритма на время нахождения пути. В качестве определения новых закономерностей определялись факторы влияния размеров поля, сложности поля (количество, размеры, расположение препятствий) и удаленности стартовой и финальной точек на время выполнения

алгоритма. Для того чтобы убрать погрешность загруженности ЦП сторонними программами каждый вариант был просчитан 100 раз. Затем было выведено среднее значение среди 100 запусков.

Для оценки влияния размеров поля были выбраны размеры 20x20, 25x25 и 30x30 клеток. Расположение препятствий, начальной и конечной точек переносилось с маленького поля на поле больших размеров без изменений, увеличение пространства происходило за счет добавления клеток по краям, препятствия добавлялись так же. В табл. 1 приведены полученные результаты:

**Таблица 1.** Результаты оценки влияния размеров поля

**Table 1.** Results of evaluating the impact of of field size

Размер / Size	20x20	25x25	30x30
Среднее время выполнения (мс)	~8.55	~20.15	~47.8

На основе полученных результатов сделан вывод, что увеличение размеров поля приводит к увеличению времени выполнения алгоритма за счет того, что увеличивается количество возможных вариантов пути, следовательно, увеличивается и граф для осуществления поиска в ширину. Большое количество вариантов требует большего количества времени для расчётов.

Для оценки влияния сложности поля были пустое поле, поле со случайно расставленными препятствиями и поле, в котором было смоделированные движение змейкой (слева на право/справа на лево). Размеры поля во всех случаях 20x20 клеток. Начальная и конечная позиция расставлены максимально далеко друг от друга в противоположных углах поля. В табл. 2 приведены полученные результаты.

**Таблица 2.** Результаты оценки влияния сложности поля

**Table 2.** Results of evaluating the impact of field complexity

Сложность / Difficulty	Пустое / Empty	Случайное / Random	“Змейка” / “Snake”
Среднее время выполнения (мс)	~15	~9	~5

На основе полученных результатов сделан вывод, что изменение сложности поля приводит к уменьшению времени выполнения алгоритма. Пустое поле потребовало больше всего времени так как алгоритму нужно было проверить все точки пространства на пути к финальной точке. С появлением препятствий, количество возможных вариантов уменьшилось, что и повлияло на уменьшение времени работы алгоритма.

Для оценки влияния удаленности стартовой и финальной точек было выбрано поле размером 20x20 клеток. Точки были расставлены на максимальном (на основе теоремы Пифагора на расстоянии ~25.5 точек), среднем (15.5 точек) и маленьком (7.8 точек) удалении друг от друга. Расположение препятствий оставалось неизменным. В табл. 3 приведены полученные результаты.

**Таблица 3.** Результаты оценки влияния расстояния между точками

**Table 3.** Results of evaluating the impact of the distance between points

Расстояние / Distance	Маленькое / Small	Среднее / Medium	Максимальное / Maximum
Среднее время выполнения (мс)	~5	~6	~9

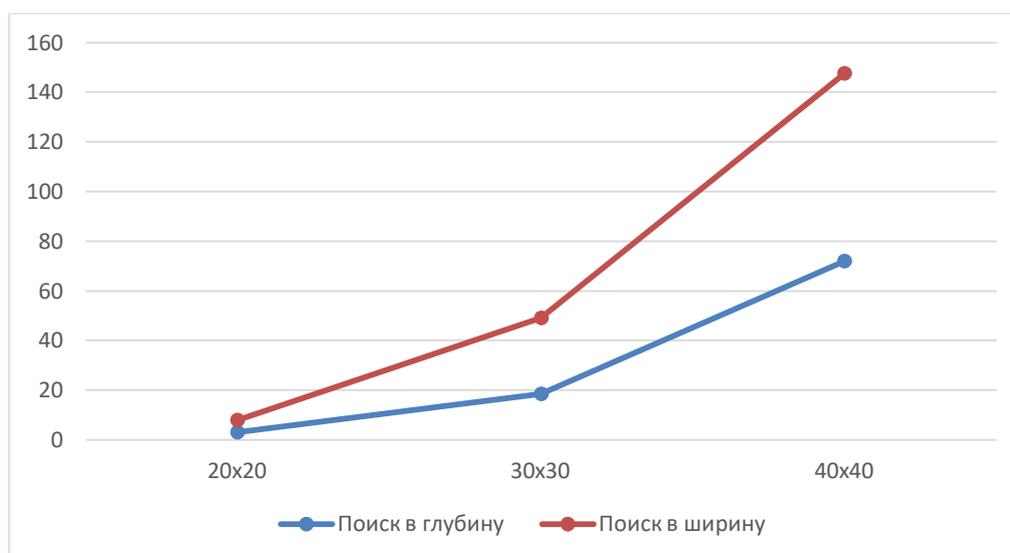
На основе полученных результатов сделан вывод, что чем дальше начальная и конечная точки друг от друга, тем больше времени потребуется на выполнение алгоритма, учитывая, что расположение препятствий не меняется.

В результате проведенного эксперимента получена закономерность  $t_a = f(w, h)$  для подготовленных образцов искомого поля, которая выражается в зависимости времени выполнения алгоритма от длины и ширины поля.

Однако стоит отметить, что увеличение размера поля и добавление дополнительных препятствий влечет за собой увеличение использования памяти, так как появляется больше вершин для исследования и увеличивается количество ветвей в графе, то есть понадобится больше места для хранения информации о вершинах в очереди на проверку и посещенных вершинах. Данный факт является одним из недостатков рассмотренного алгоритма.

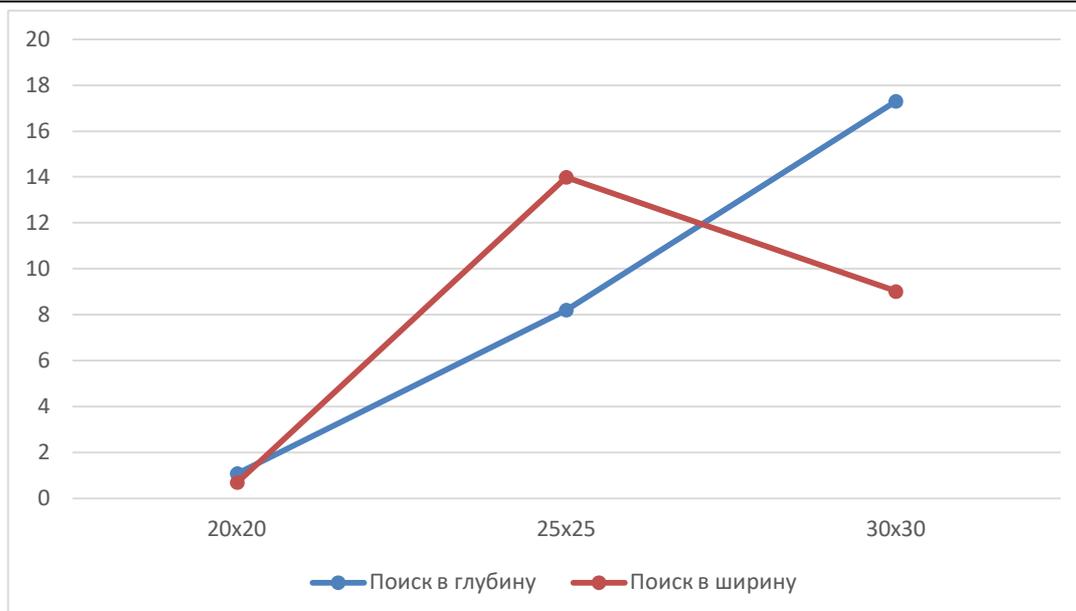
Также было проведено сравнение алгоритмов поиска в ширину и глубину на 2 типах карт: пустая и лабиринт. На пустой карте точки располагались в максимальном удалении друг от друга, то есть количество вершин графа было самым большим из возможных. Лабиринты были построены случайным образом. Время рассчитано в миллисекундах. Время выполнения является средним временем из 100 прогонов. Результаты сравнения представлены на рис. 8 и рис. 9.

На пустой карте заметно преимущество в скорости у поиска в глубину в 2-2,5 раза. Однако путь, найденный им, не был наикротчайшим, в то время как поиск в ширину показывал оптимальный путь. Причиной медлительности поиска в ширину в данном случае является то, что начальная и искомая точки максимально удалены друг от друга, то есть поиск в ширину производит проверку всей карты, в отличие от поиска в глубину.



**Рис. 8.** Результаты сравнения алгоритмов поиска в ширину и глубину на пустой карте

**Fig. 8.** Comparison results of breadth-first and depth-first search algorithms on an empty map



**Рис. 9.** Результаты сравнения алгоритмов поиска в ширину и глубину в лабиринте

**Fig. 9.** Comparison results of breadth-first and depth-first search algorithms in a maze

При этом, в лабиринте наблюдаются перемешанные результаты, то есть и тот и другой алгоритм могут быть быстрее. Это зависит от таких факторов, как удаленность точек, конфигурация лабиринта, реализация поиска в глубину, а точнее порядок выбора направления для постройки графа. То есть, если искомая точка находится в левом направлении от начальной, но алгоритм пойдет вправо, то время выполнения увеличится. Как и на пустой карте, в лабиринте путь, рассчитанный поиском в глубину, не был оптимальным. Поиск в ширину выдавал кратчайший путь.

### Выводы

В данной работе был представлен алгоритм поиска в ширину, который обладает такими преимуществами, как способность находить самый короткий путь, время выполнения алгоритма в

сравнении с аналогами, надежность (путь будет найден, если он существует) и детерминированность.

Представлена реализация алгоритма поиска в ширину на языке программирования `C#` и результаты экспериментов: изучение влияния различных факторов на время выполнения алгоритма и сравнение с алгоритмом поиска в глубину. Был сделан вывод, что увеличение размеров поля, уменьшения количества препятствий и расстояния между стартовой и финальной точками увеличивает время выполнения алгоритма. А также, что быстродействие обоих алгоритмов варьируется и зависит от удаленности точек и конфигурации лабиринта. Однако во всех случаях поиск в ширину выдавал кратчайший путь, поиск в глубину – нет.

В будущем исследовании планируется изучение влияния размеров поля на найденную дистанцию.

### Список литературы

1. Panigrahi P.K., Tripathy H.K. Analysis on intelligent based navigation and path finding of autonomous mobile robot // *Information systems design and intelligent applications*. 2015; № 339: 219–232. <http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-2250-7>.
2. Luo Q., Wang H., Zheng Y., He J. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm // *Neural Computing and Applications*. 2020; № 32: 1555–1566. <https://doi.org/10.1177/1729881418774673>.
3. Fuzzy Gain-Based Dynamic Ant Colony Optimization for Path Planning in Dynamic Environments / V. Sangeetha, R. Krishankumar, K.S. Ravichandran, F. Cavallaro, S. Kar, D. Pamucar, A. A. Mardani // *Symmetry*. 2021; №13(2): 280. <https://doi.org/10.3390/sym13020280>.
4. 3D path planning for the ground robot with improved ant colony optimization / L. Wang, J. Kan, J. Guo, C. Wang // *Sensors*. 2019; №19(4): 815. <https://doi.org/10.3390/s19040815>.
5. Energy-efficient green ant colony optimization for path planning in dynamic 3D environments / V. Sangeetha, R. Krishankumar, K. Ravichandran, S. Kar // *Soft Computing*. 2021; №25(15): 4749–4769. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05483-6>.
6. Saraswathi M., Murali G.B., Deepak B. Optimal path planning of mobile robot using hybrid cuckoo search-bat algorithm // *Procedia Computer Science*. 2018; № 133: 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.064>.
7. Gilhyun R. Applying asynchronous deep classification networks and gaming reinforcement learning-based motion planners to mobile robots // *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018; <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460798>.
8. Path Planning of multiagent constrained formation through deep reinforcement Learning / Z. Sui, Z. Pu, J. Yi, X. Tian // *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2018; <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489066>.
9. Continuous control with deep reinforcement learning / T. P. Lillicrap, J. J. Hunt, A. Pritzel, N. Heess, T. Erez, Y. Tassa, D. Silver, D. Wierstra // *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2016; №4(4). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.02971>.
10. Trust region policy optimization / J. Schulman, S. Levine, P. Moritz, M. I. Jordan, P. Abbeel // *31st International Conference on Machine Learning*. 2015; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.05477>.
11. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal policy optimization algorithms. *arXiv 2017*, arXiv:1707.06347v2. 2017; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347>.
12. A Collision-Aware Mobile Robot Navigation in Grid Environment using Improved Breadth First Search / H.K. Tripathy, S. Mishra, H.K. Thakkar, D. Rai // *Computers & Electrical Engineering*. 2021; №4. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107327>.

13. Panigrahi P.K., Bisoy S.K., Tripathy H.K. Intelligent Path Planning with Improved BFS (I-BFS) Strategy for Mobile Robot in RFID Equipped Unknown Environment // Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Data Engineering. 2022; №99:237-249. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7182-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7182-1_20).

14. Breadth First Search Approach for Shortest Path Solution in Cartesian Area / R. Rahim, D. Abdullah, S. Nurarif, M. Ramadhan et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2018; №1019(1):12-36. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1019/1/012036>.

15. Zhou C., Huang B., Fränti P. A review of motion planning algorithms for intelligent robots // Journal of Intelligent Manufacturing. 2022; №33: 387–424. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01867-z>.

16. Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo, A. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review // Sensors. 2021; №21: 7898. <https://doi.org/10.3390/s21237898>.

17. Adaptive path finding algorithm in dynamic environment for warehouse robot / Ng MK., Chong, YW., Ko, Km. et al. // Neural Computing and Applications. 2020; №32: 13155–13171. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04764-3>.

18. Search Methods in Motion Planning for Mobile Robots / L. Paulino, C. Hannum, A.S. Varde, C.J. Conti // Intelligent Systems and Applications. 2021; № 296: 802-822. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82199-9\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82199-9_54) 2021.

19. Черноскутов М. А. Использование GPU для ускорения поиска в ширину на графах // Параллельные вычислительные технологии 2013 (ПаВТ'2013). 2013. С. 560-565.

20. Колганов А. С. Самая быстрая и энергоэффективная реализация алгоритма поиска в ширину на одноузловых различных параллельных архитектурах согласно рейтингу Graph500 // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2018). 2018. С. 273-285.

21. Козик А. А., Побегайло А.П. Ускорение параллельного поиска в ширину в графах при вычислениях на GPU // Вестник БГУ. 2015; № 2: 102-107.

22. Черноскутов М. А. Методы высокопроизводительной обработки графов // Восьмая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям. Томск, 2015. С. 73-80. DOI 10.17223/978-5-7511-2389-5/11.

23. Черноскутов М. А. Параллельная высокопроизводительная обработка графов // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016). 2016; С. 736-742.

24. Corey L. Lanum. Visualizing Graph Data. New York: Manning Publications Co; 2016.

25. Correll N. Introduction to autonomous robots. Davis: LibreTexts; 2021.

26. Касьянов Я. В., Федотова Е. В., Штыбина К. В. Анализ развития алгоритмов планирования маршрутов мобильных наземных роботов // Автоматизация, мехатрони-

ка, информационные технологии: материалы X Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых. Омск, 2020. С. 64-70.

27. Бобырь М.В., Титов В.С., Беломестная А.Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 6. С. 38-41.

28. Bobyr M.V., Titvo V.S. Nasser A.A. Automation of the Cutting-Speed Control Process Based on Soft Fuzzy Logic Computing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol.44. No7. P. 633-641. DOI 10.3103/S1052618815070067.

29. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. Автоматическая компенсация тепловых деформаций шпиндельных узлов прецизионного оборудования с ЧПУ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 11. С. 31-35.

30. Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 107-125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.

## References

1. Panigrahi P.K., Tripathy H.K. Analysis on intelligent based navigation and path finding of autonomous mobile robot. *Information systems design and intelligent applications*. 2015; № 339: 219–232. <http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-2250-7>.

2. Luo Q., Wang H., Zheng Y., He J. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm. *Neural Computing and Applications*. 2020; № 32: 1555–1566. <https://doi.org/10.1177/1729881418774673>.

3. Sangeetha V., Krishankumar R., Ravichandran K.S., Cavallaro F., Kar S., Pamucar D., Mardani A. A Fuzzy Gain-Based Dynamic Ant Colony Optimization for Path Planning in Dynamic Environments. *Symmetry*. 2021; №13(2): 280. <https://doi.org/10.3390/sym13020280>.

4. Wang L., Kan J., Guo J., Wang, C. 3D path planning for the ground robot with improved ant colony optimization. *Sensors*. 2019; №19(4): 815. <https://doi.org/10.3390/s19040815>.

5. Sangeetha V., Krishankumar R., Ravichandran K., Kar S. Energy-efficient green ant colony optimization for path planning in dynamic 3D environments. *Soft Computing*. 2021; №25(15): 4749–4769. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05483-6>.

6. Saraswathi M., Murali G.B., Deepak B. Optimal path planning of mobile robot using hybrid cuckoo search-bat algorithm. *Procedia Computer Science*. 2018; № 133: 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.064>.

7. Gilhyun R. Applying asynchronous deep classification networks and gaming reinforcement learning-based motion planners to mobile robots. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018; <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460798>.

8. Sui Z., Pu Z., Yi J., Tian X. Path Planning of multiagent constrained formation through deep reinforcement Learning. *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2018; <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489066>.

9. Lillicrap T. P., Hunt J. J., Pritzel A., Heess N., Erez T., Tassa Y., Silver D., Wierstra D. Continuous control with deep reinforcement learning. *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2016; №4(4). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.02971>.

10. Schulman J., Levine S., Moritz P., Jordan M. I., Abbeel P. Trust region policy optimization. *31st International Conference on Machine Learning*. 2015; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.05477>.

11. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal policy optimization algorithms. *arXiv 2017, arXiv:1707.06347v2*. 2017; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347>.

12. Tripathy H.K., Mishra S., Thakkar H.K., Rai D. A Collision-Aware Mobile Robot Navigation in Grid Environment using Improved Breadth First Search. *Computers & Electrical Engineering*. 2021; №4. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107327>.

13. Panigrahi P.K., Bisoy S.K., Tripathy H.K. Intelligent Path Planning with Improved BFS (I-BFS) Strategy for Mobile Robot in RFID Equipped Unknown Environment. *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Data Engineering*. 2022; №99:237-249. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7182-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7182-1_20).

14. Rahim R., Abdullah D, Nurarif S., Ramadhan M. et al. Breadth First Search Approach for Shortest Path Solution in Cartesian Area. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; №1019(1):12-36. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1019/1/012036>.

15. Zhou C., Huang B., Fränti P. A review of motion planning algorithms for intelligent robots. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022; №33: 387–424. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01867-z>.

16. Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo, A. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review. *Sensors*. 2021; №21: 7898. <https://doi.org/10.3390/s21237898>.

17. Ng MK., Chong, YW., Ko, Km. et al. Adaptive path finding algorithm in dynamic environment for warehouse robot. *Neural Computing and Applications*. 2020; №32: 13155–13171. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04764-3>.

18. Paulino L., Hannum C., Varde A.S., Conti, C.J. Search Methods in Motion Planning for Mobile Robots. *Intelligent Systems and Applications*. 2021; № 296: 802-822. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82199-9\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82199-9_54) 2021.

19. Chernoskutov M. A. Ispol'zovanie GPU dlya uskoreniya poiska v shirinu na grafakh [Using GPU to speed up breadth-first search on graphs]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii 2013 (PaVT'2013) = Parallel computing technologies 2013 (PaVT'2013)*, 2013; pp. 560-565.

20. Kolganov A. S. Samaya bystraya i energoeffektivnaya realizatsiya algoritma poiska v shirinu na odnouzlovykh razlichnykh parallel'nykh arkhitekturakh soglasno reitingu Graph500 [The fastest and most energy-efficient implementation of breadth-first search algorithm on single-node various parallel architectures according to Graph500 rating]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2018) = Parallel computing technologies (PaVT'2018)*, 2018, pp. 273-285.

21. Kozik A.A., Pobegailo A.P. Uskorenie parallel'nogo poiska v shirinu v gra-fakh pri vychisleniyakh na GPU [Acceleration of parallel breadth-first search in graphs when computing on the GPU]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*. 2015, no. 2: 102-107.

22. Chernoskutov M.A. [Methods of high-performance processing of graphs]. *Vos'maya Sibirskaya konferentsiya po parallel'nym i vysokoproizvoditel'nykh vychisleniyam [Eighth Siberian Conference on Parallel and High-Performance Computing]*. Tomsk, 2015; pp. 73-80. DOI 10.17223/978-5-7511-2389-5/11 (In Russ.).

23. Chernoskutov M. A. Parallel'naya vysokoproizvoditel'naya obrabotka grafov [Parallel high-performance processing of graphs]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2016) = Parallel computing technologies (PaVT'2016)*. 2016; pp. 736-742.

24. Corey L. Lanum. *Visualizing Graph Data*. New York: Manning Publications Co; 2016.

25. Correll N. *Introduction to autonomous robots*. Davis: LibreTexts; 2021.

26. Kasyanov Ya. V., Fedotova E. V., Shtybina K. V. [Analysis of the development of route planning algorithms for mobile ground robots]. *Avtomatizatsiya, mekhatronika, informatsionnye tekhnologii. Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh* [Automation, mechatronics, information technology. Proceedings of the X International Scientific and Technical Internet Conference for Young Scientists]. Omsk, 2020, pp. 64-70 (In Russ.).

27. Bobyry M.V., Titov V.S., Belomestnaja A.L. Stabilizatsiya teplovogo rezhima v protsesse rezaniya [Stabilizatsiya teplovogo rezhima v protsesse rezaniya]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mehatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 6, pp. 38-41.

28. Bobyry M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the Cutting-Speed Control Process Based on Soft Fuzzy Logic Computing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015, vol.44, no.7, pp. 633-641. DOI 10.3103/S1052618815070067.

29. Titov V.S., Bobyry M.V., Milostnaya N.A. Avtomaticheskaya kompensatsiya teplovykh deformatsii shpindel'nykh uzlov pretsizionnogo oborudovaniya s ChPU [Avtomaticheskaya kompensatsiya teplovykh deformatsij shpindel'nykh uzlov precizionnogo oborudovaniya s ChPU]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2006, no. 11, pp. 31-35.

30. Zakharov K. S., Saveliev A. I. Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 107-125 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Емельянов Сергей Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, ректор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [rector@swsu.ru](mailto:rector@swsu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

**Sergei G. Emelianov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [rector@swsu.ru](mailto:rector@swsu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

**Бобырь Максим Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [fregat\\_mn@rambler.ru](mailto:fregat_mn@rambler.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

**Maxim V. Bobyr**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [fregat\\_mn@rambler.ru](mailto:fregat_mn@rambler.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

**Крюков Александр Георгиевич**, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [saskryukov@yandex.ru](mailto:saskryukov@yandex.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4235-6975>, Researcher ID: AFA-6564-2022

**Aleksander G. Kryukov**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [saskryukov@yandex.ru](mailto:saskryukov@yandex.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4235-6975>, Researcher ID: AFA-6564-2022



## Алгоритмы обработки информации в системе слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве

Я.М. Трофименко <sup>1</sup>✉, Е.В. Ершов <sup>2</sup>, И.А. Варфоломеев <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Северсталь Диджитал»  
ул. Клары Цеткин, д. 2, вн.тер.г. муниципальный округ Коптево г. Москва 127299, Российская Федерация

<sup>2</sup> Череповецкий государственный университет  
пр-т Луначарского, д. 5, г. Череповец 162600, Российская Федерация

✉ e-mail: trofimenko.y.m@yandex.ru

### Резюме

**Целью исследования** является повышение оперативности контроля над перемещением стальковшей в сталеплавильном производстве при помощи разработки математического и программного обеспечения.

**Методы.** Контроль перемещения сталеразливочных ковшей можно разделить на 2 части: первая – это обнаружение объекта на изображении с камеры, расположенной на определённом участке маршрута, с последующим определением положения объекта в кадре, а вторая часть – это идентификация на основании массива данных из разных систем. В работе использовались методы математического моделирования, нейронных сетей, основы теории построения алгоритмов, а так же программные и аппаратные средства современных компьютерных технологий. В статье описывается модель формирования маршрутов перемещения сталеразливочных ковшей, на основе которой осуществляется контроль перемещения сталеразливочных ковшей. Алгоритмическое обеспечение представляет собой совокупность таких алгоритмов, как: алгоритм формирования возможных маршрутов перемещения стальковшей, алгоритм определения положения стальковша на маршруте перемещения стальковшей, алгоритм идентификации сталеразливочного ковша и обобщённый алгоритм обработки информации. Приведена структурно-функциональная организация системы слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве.

**Результаты.** Экспериментальная проверка алгоритмического обеспечения осуществлялась на тестовом наборе данных, который, в свою очередь, был сформирован из реальных технологических данных. Адаптация и настройка алгоритмического и программного обеспечения позволит применить данный комплекс на сталеплавильных производствах с различным составом агрегатов.

**Заключение.** Контроль над перемещением стальковшей позволяет выстраивать процесс так, чтобы перемещение жидкой стали сопровождалось наименьшими потерями тепла. Необходимость нагрева стали на агрегатах внепечной обработки сопряжена с затратами энергии. Таким образом, уменьшение потерь тепла и времени простоев стальковшей позволит уменьшить затраты энергии на весь процесс.

**Ключевые слова:** сталеразливочный ковш; обнаружение; идентификация объектов; маршрут; система слежения.

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

**Для цитирования:** Трофименко Я.М., Ершов Е.В., Варфоломеев И.А. Алгоритмы обработки информации в системе слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 57-74. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-57-74>.

Поступила в редакцию 05.08.2022

Подписана в печать 20.09.2022

Опубликована 14.10.2022

© Трофименко Я.М., Ершов Е.В., Варфоломеев И.А., 2022

## Information Processing Algorithms in the Steel-Teeming Ladles Tracking System in Steelmaking

Yaroslav M. Trofimenko <sup>1</sup>✉, Evgenii V. Ershov <sup>2</sup>, Igor' A. Varfolomeev <sup>2</sup>

<sup>1</sup> «Severstal Digital» LLC

2, Klara Tsetkin str., ext.ter.g. Koptevo municipal district, Moscow 127299, Russian Federation

<sup>2</sup> Cherepovets State University

5, Lunacharsky Ave., Cherepovets 162600, Russian Federation

✉ e-mail: trofimenko.y.m@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of research is to increase the efficiency of control over the movement of steel ladles in steelmaking, through the development of mathematical and software.

**Methods.** The control of the movement of steel-pouring ladles can be divided into 2 parts: the first is the object detection in the image from a camera located on a certain section of the route, followed by determining the position of the object in the frame, and the second part is identification based on an array of data from different systems. Methods used in research are: mathematical modeling, neural networks, the basics of the theory of algorithms construction, as well as software and hardware of modern computer technologies. The article describes a model for the routes generation for the movement of steel ladles, on the basis of which the control of the movement of steel ladles is carried out. Algorithmic support is a combination of such algorithms as: an algorithm for generating possible routes for moving steel ladles, an algorithm for determining the position of a steel ladle on a route for moving steel ladles, an algorithm for identifying a steel ladle and a generalized algorithm for processing information. The structural-functional organization of the tracking system for steel-pouring ladles in steel-smelting production is given.

**Results.** Experimental verification of algorithmic support was carried out on a test data set, which was formed from real technological data. Adaptation and tuning of the algorithms and software will make it possible to apply this software system in steelmaking plants with a different composition of plant units.

**Conclusion.** Control over the movement of steel ladles allows build the process so that the movement of liquid steel will cause minimal heat loss. The need to heat steel in secondary processing units is correlates with energy costs. Thus, reducing heat loss and downtime of steel ladles will reduce energy costs for the entire process.

**Keywords:** steel-teeming ladle; detection; object identification; route; tracking system.

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

**For citation:** Trofimenko Y. M., Ershov E. V., Varfolomeev I. A. Information Processing Algorithms in the Steel-Teeming Ladles Tracking System in Steelmaking. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 57-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-57-74>.

Received 05.08.2022

Accepted 20.09.2022

Published 14.10.2022

## Введение

Система слежения за перемещением сталеразливочных ковшей представляет собой комплекс программно-аппаратных средств, осуществляющий обнаружение и идентификацию стальной ковшей на участках цехов сталеплавильного производства. Интеллектуальная система технического зрения представляет собой аппаратно-программный комплекс, использующийся для автоматизированного сбора информации с потокового видео. Так как стальковш является нестандартным объектом, то требуется разработка специализированной интеллектуальной системы видеонаблюдения [1]. Кроме того, точность работы интеллектуальной системы технического зрения сильно зависит от визуальной разницы между отслеживаемым объектом и его окружением [2]. Важную роль играет частота кадров камеры, поскольку камера с низкой частотой кадров не успеет отследить объект, движущийся с высокой скоростью, либо изображение будет искажено, что не позволит идентифицировать объект<sup>1</sup>. Одним из главных преимуществ интеллектуальной системы видеонаблюдения является её многофункциональность [3, 4], что позволяет осуществлять обнаружение объекта и его локализацию в кадре [5, 6], идентификацию или клас-

сификацию [7, 8, 9, 10], контроль окружения или выявление тревожных ситуаций [11] и т.п. Из-за специфики технологического процесса в сталеплавильном производстве система слежения должна удовлетворять ряду требований, для чего необходима реализация алгоритмов, отвечающих за конкретные части процесса распознавания и идентификации стальной ковшей и за последующее отслеживание перемещений. Поскольку возможны различные варианты перемещения стальной ковшей, то для их отслеживания необходима разработка модели формирования маршрутов перемещения, а так же разработка ряда алгоритмов для обработки данных и формирования результата отслеживания на их основе. Вследствие того, что объектом слежения является стальковш, на который воздействует высокая температура и вибрации, важным преимуществом интеллектуальной системы видеонаблюдения является отсутствие необходимости установки датчиков или маячков на объект [12, 13, 14], а так же возможность использования не узкоспециализированного оборудования, а обычных видеокамер и ПК с подходящими характеристиками [15].

## Материалы и методы

Модель формирования маршрутов перемещения сталеразливочных ковшей

Модель формирования маршрутов перемещения стальной ковшей реализуется на основе таких параметров, как: коли-

<sup>1</sup> Ганин А.Н. Сопровождение и распознавание объектов на телевизионных изображениях: дис. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2013. 149 с.

чество агрегатов каждого типа, расположение агрегатов в пролётах, способы перемещения стальной между агрегатами и между пролётами<sup>1</sup>. Модель представляет собой ориентированный граф. Стоит отметить, что узлами в таком графе являются не только агрегаты, но и позиции, на которых происходит смена типа перемещения стальной [16]. Перечислим основные узлы, между которыми осуществляются перемещения стальной:

1, 2, 3 – конвертеры;

4, 5, 6 – позиции на агрегате установка доводки металла (УДМ);

7, 8 – агрегаты «установка печь ковш» (УПК-1) и (УПК-2);

9, 10 – позиции агрегата «установка вакуумирования стали» (УВС);

11, 12, 13, 14, 15 – агрегаты «установка непрерывной разливки стали» (УНРС-1, УНРС-2, УНРС-3, УНРС-4, УНРС-5);

16, 17 – горелки для сушки ковшей в пролёте подготовки ковшей;

а, б, в, г, д, е, ж, з, и – позиции смены типа движения (снятие со сталева краном или установка краном на сталева).

Кроме узлов, стоит отметить, по каким путям между ними возможно перемещение стальной и в каких направлениях:

– пути 3-а-д, 2-б-б-е, 1-в-4-з, г-и, 5-ж, являются рельсовыми путями для стальных, первые 4 из которых, не прерываясь проходят из конвертерного пролёта в передаточный пролёт и позволяют перемещать стальной в обе стороны;

– пути внутри маршрута 16-а-б-в-г-17 соответствуют перемещению кранов внутри пролёта подготовки ковшей;

– пути внутри маршрута 7-д-е-ж-з-и-8 соответствуют перемещению кранов внутри пролёта внепечной обработки, при этом участки д-7 и и-8 являются однонаправленными, поскольку перемещение стальной после УПК-1 и УПК-2 ограничено перемещением на УВС для УПК-1, либо на ближайшие УНРС (УНРС-3, УНРС-4 для УПК-1 и УНРС-1, УНРС-2, УНРС-3 для УПК-2);

– пути 7-9 и 7-10 относятся к перемещению кранов между агрегатами УПК-1 и УВС в пролёте внепечной обработки, согласно технологии обратное перемещение не предусмотрено;

– пути 7-13 и 7-14 относятся к перемещению кранов между агрегатами УПК-1 и УНРС-3 и УНРС-4 в передаточном пролёте, согласно технологии обратное перемещение не предусмотрено;

– пути 8-11, 8-12, 8-13 относятся к перемещению кранов между агрегатами УПК-2 и УНРС-1, УНРС-2, УНРС-3, согласно технологии обратное перемещение не предусмотрено;

– пути 9-12, 9-13, 9-14, 10-12, 10-13, 10-14 относятся к перемещению кранов от агрегата УВС к УНРС-2, УНРС-3,

<sup>1</sup> Чернышев С.В. Модели, методы и алгоритмы эффективного решения задачи маршрутизации транспорта на графах больших размерностей: автореф. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. М., 2011. 22 с.

УНРС-4, согласно технологии обратное перемещение не предусмотрено;

– пути 11-и, 11-з, 11-е, 12-и, 12-з, 12-е, 13-и, 13-з, 13-е, 13-д, 14-е, 14-д, 15-з, 15-д являются путями перемещения от поворотных столов УНРС-1,

УНРС-2, УНРС-3, УНРС-4 и УНРС-5 на пути стелевозов.

На рис. 1 представлен граф маршрутов перемещения стальковшей, построенный на основе описанных узлов и путей.

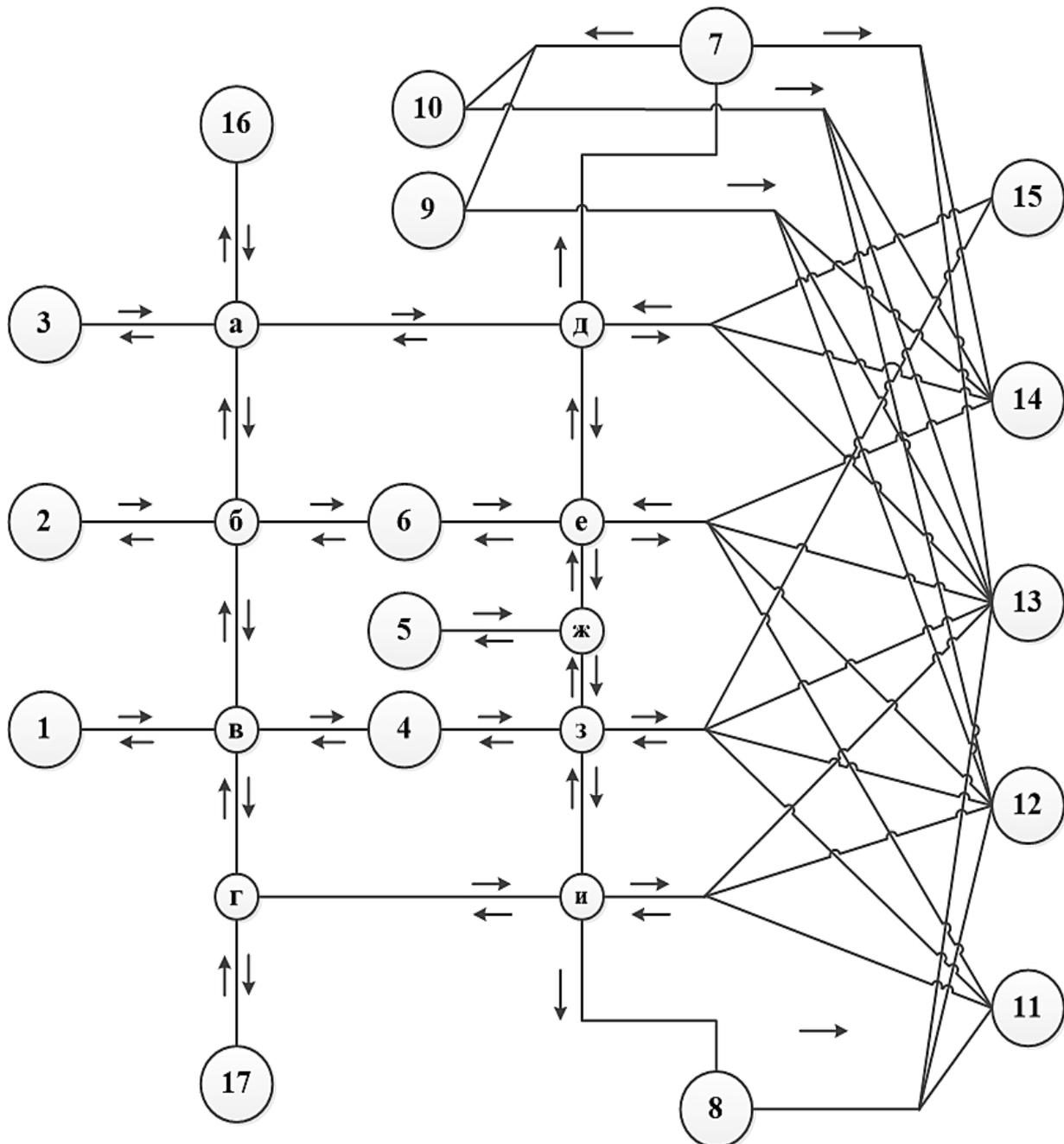


Рис. 1. Маршруты перемещения стальковшей в сталеплавильном производстве

Fig. 1. Steel ladle movement routes in steelmaking

Несмотря на то, что физически перемещение со сталевоза на поворотный стол УНРС возможно, в технологическом процессе отсутствуют плавки, которые могут быть перемещены напрямую от конвертера до разливки, что обусловлено технологиями получения конкретных марок стали [17]. Отметим, что описанные выше узлы и маршруты могут быть исключены из графа в случае планово-предупредительных ремонтов или внештатных ситуаций на участках.

Алгоритм формирования возможных маршрутов перемещения стальной в сталеплавильном производстве

Алгоритм формирования возможных маршрутов перемещения стальной в сталеплавильном производстве заключается в построении графа, вершинами в котором являются агрегаты либо другие узлы, где осуществляется смена типа движения стальной в соответствии с модели формирования маршрутов (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм формирования возможных маршрутов перемещения стальной в сталеплавильном производстве

Fig. 2. Possible movements routes of steel ladles generation algorithm

Входными данными для алгоритма являются узлы и расстояния между ними. Из узлов формируются вершины графа, а рёбра между ними строятся на основании фактической возможности перемещения стальной ковша от агрегата к агрегату. Кроме того, каждое ребро имеет направление, таким образом граф является ориентированным.

#### Алгоритм определения положения стальной ковша на маршруте перемещения стальной ковша

Алгоритм определения положения стальной ковша на маршруте перемещения стальной ковша (рис. 3) осуществляет поиск и фильтрацию найденных объектов на изображениях с камер. Входными данными для данного алгоритма являются координаты стальной ковша и размеры описывающего прямоугольника, получаемые от нейронной сети, а так же массив координат предшествовавших текущим с размерами описывающих прямоугольников соответственно. Массив необходим для отслеживания перемещения ранее найденного стальной ковша или фиксации появления нового стальной ковша на участке. Для ранее найденного стальной ковша осуществляется трекинг по координатам с учётом возможного изменения его размеров в кадре. Возможные изменения координат и размеров описывающего прямоугольника зависят от положения камеры относительно пути перемещения стальной ковша на участке [9]. Алгоритм можно разбить на следующие шаги:

- получение координат сталеразливочного ковша, обнаруженного на изображении, от нейросети;
- чтение массива предшествовавших координат стальной ковша;
- сопоставление координат для проверки появления нового стальной ковша на участке:

Для случая с появлением нового стальной ковша трекинг не производится, но фиксируется факт появления нового объекта на участке маршрута перемещений:

- для остальных случаев выполняется трекинг по указанному на схеме алгоритму;
- формирование результата определения положения стальной ковша на маршруте;
- передача сформированных данных.

#### Алгоритм идентификации сталеразливочного ковша

Идентификация сталеразливочного ковша (рис. 4) осуществляется на основе работы предыдущих алгоритмов и заключается в сопоставлении данных о положении стальной ковша на конкретном участке, о возможных маршрутах между основными узлами и о работе отдельных агрегатов. Входными данными для алгоритма идентификации являются:

- обработанные данные с контроллеров и баз данных с уровня технологии;
- возможные маршруты перемещения в сталеплавильном производстве;
- результат определения положения стальной ковша.

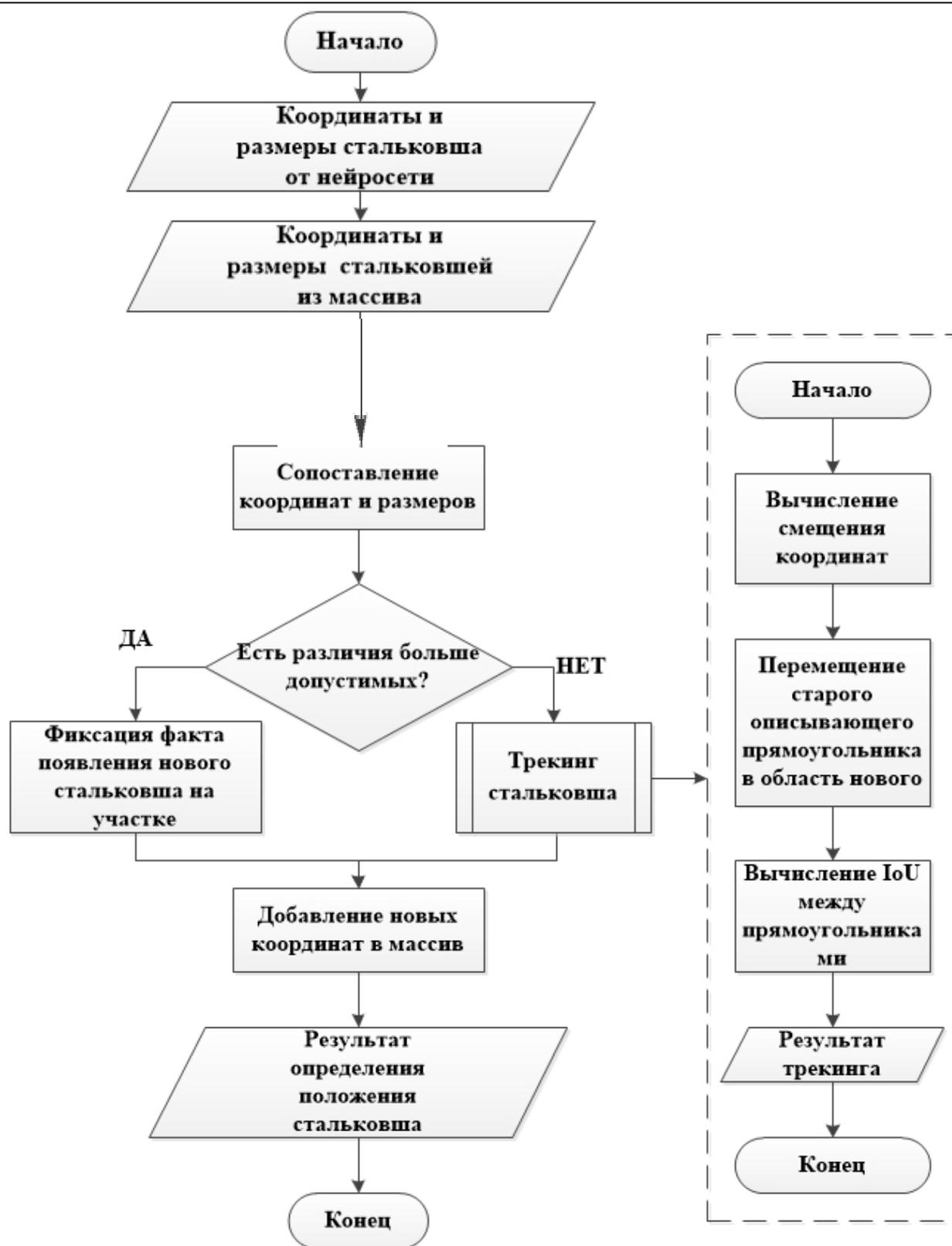


Рис. 3. Алгоритм определения положения стальной ковша на маршруте перемещения стальной ковша

Fig. 3. Steel ladle on the movement route position determination algorithm

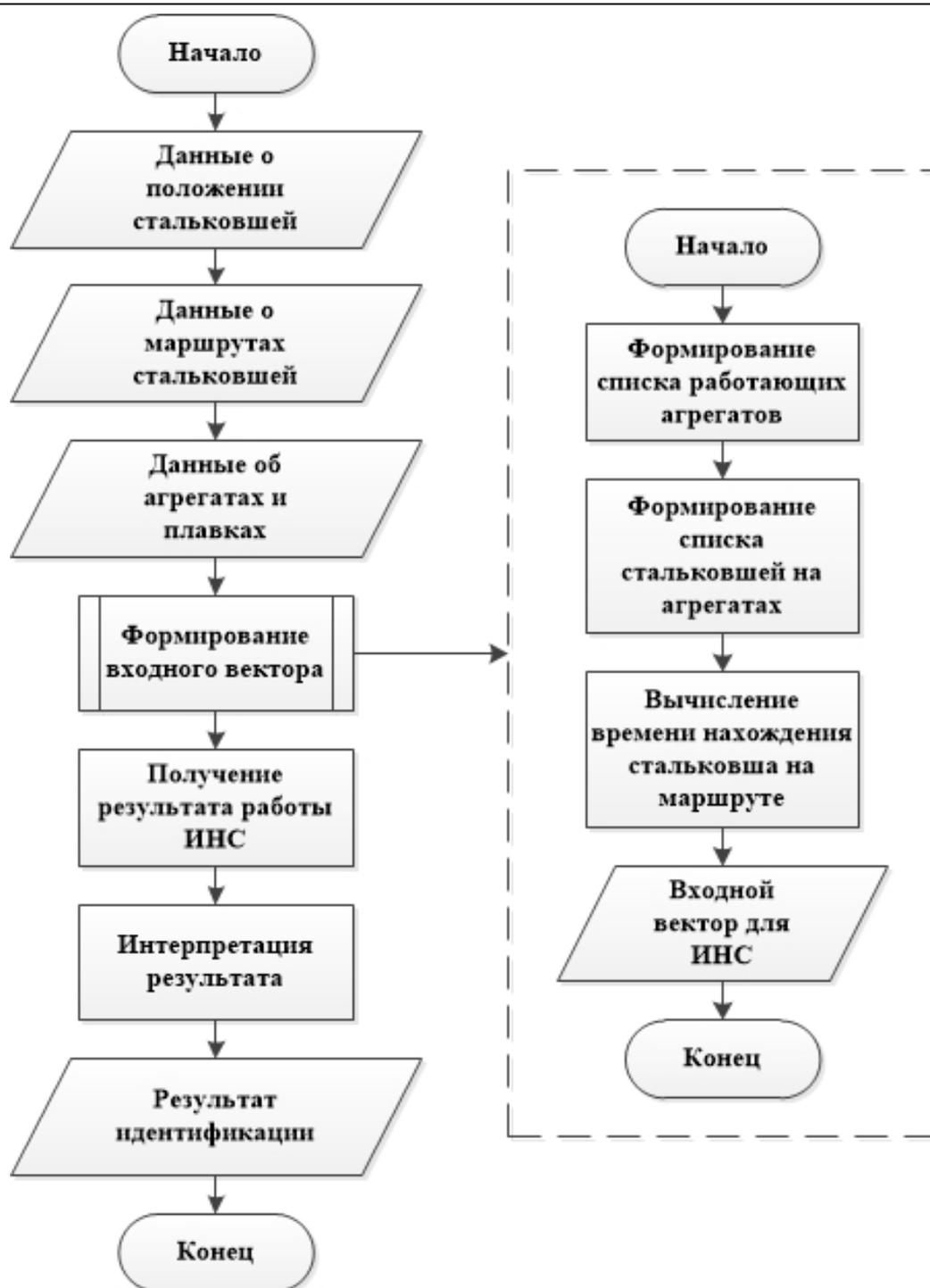


Рис. 4. Алгоритм идентификации стальной ковше

Fig. 4. Steel ladle identification algorithm

Совокупность данных позволяет отфильтровать те стальной ковше, которые находятся непосредственно на агрегатах и исключить их из возможных вариантов для идентификации до момента, пока они не окажутся вне агрегата. Анало-

гично фильтруются рабочие агрегаты и соответствующие участки маршрутов. Кроме того, вычисляется время нахождения стальной ковше на маршруте с момента начала плавки.

Обобщённый алгоритм обработки информации в системе слежения за стальковшами

Обобщённый алгоритм представляет собой совокупность основных операций по обработке информации в системе слежения за стальковшами, начиная от получения видеопотоков с камер, за-

канчивая формированием результата работы системы слежения (рис. 5). Данный алгоритм включает в себя как шаги по подготовке данных и обучение нейросетей, так и основную последовательность шагов, выполняемую циклично в процессе работы системы слежения за стальковшами.

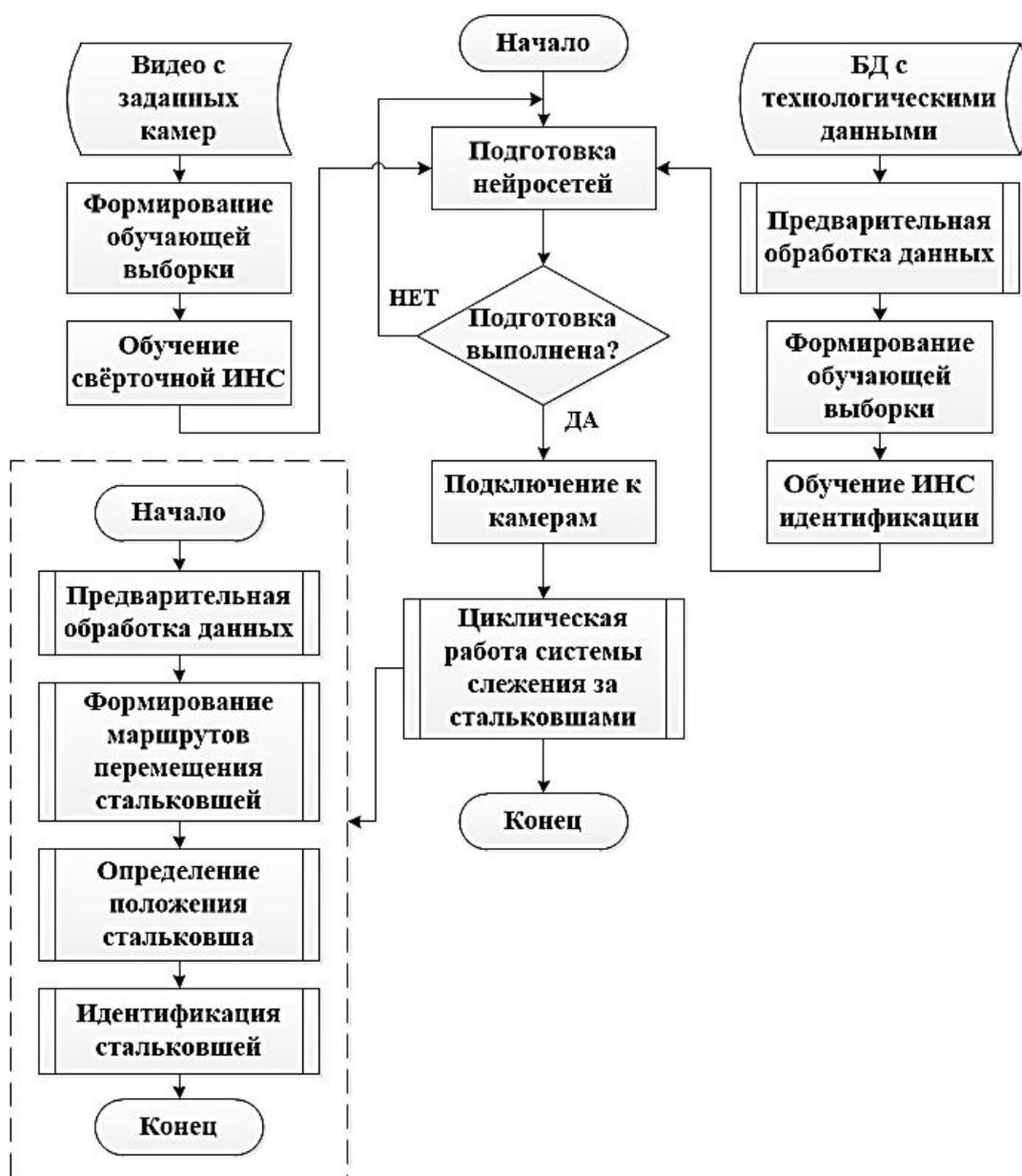


Рис. 5. Обобщённый алгоритм обработки информации

Fig. 5. Generalized information processing algorithm

Шаги по подготовке данных и обучению нейросетей представляют собой два независимых процесса, один из которых связан с получением видео с заданных камер, на основе кадров из которых осуществляется формирование выборки и дальнейшее обучение нейросети для обнаружения стальной. Второй процесс подготовки включает в себя предварительную обработку данных из технологической БД, с последующим формированием выборки и обучением нейросети идентификации. После завершения подготовки производится подключение системы к набору камер.

Циклическую работу системы можно представить следующим образом:

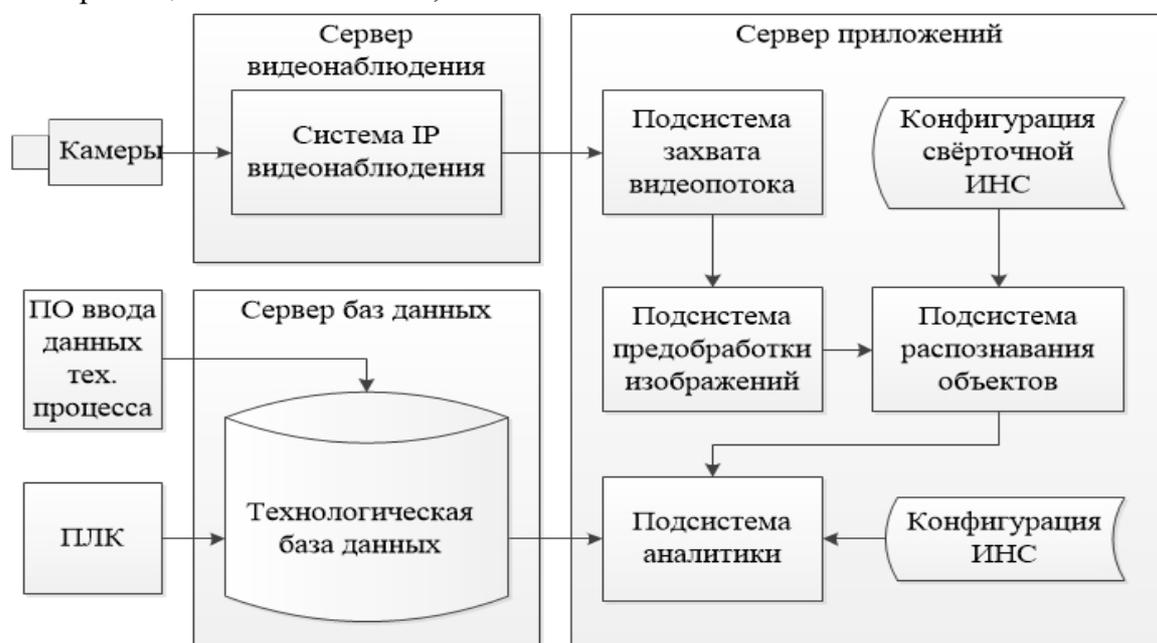
- предварительная обработка исходных данных, получаемых из технологических баз данных;
- формирование возможных маршрутов перемещения стальной;

- нахождения стальной на изображениях;

- формирование результатов идентификации стальной на различных участках сталеплавильного производства.

Описание системы слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве

На основе алгоритмов, описанных выше, было реализовано программное обеспечение. Структурно-функциональная организация системы слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве приведена с разделением на аппаратные и программные блоки и взаимосвязи между ними. На рис. 6 представлена структурно-функциональная организация системы слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве.



**Рис. 6.** Структурно-функциональная организация системы слежения за сталеразливочными ковшами в сталеплавильном производстве

**Fig. 6.** Structural-functional organization of the tracking system for steel ladles in steelmaking

Аппаратной частью системы слежения за стальковшами является сервер приложений, но стоит отметить, что в работе системы слежения используется информация, поступающая от внешних серверов. Такими серверами являются сервер видеонаблюдения и сервер баз данных. На сервере видеонаблюдения работает система, отвечающая за взаимодействие с IP-видеокамерами сталеплавильного производства, позволяющая системе слежения получать видеопоток с интересующих камер. На сервере баз данных размещены системы управления базами данных, содержащие в себе информацию с контроллеров агрегатов и другую информацию о технологическом процессе, поступающую с постов управления агрегатами. На сервере приложений расположены основные функциональные блоки системы слежения, к которым относятся:

- подсистема захвата видеопотока, взаимодействующая с камерами;
- подсистема предварительной обработки изображений, задача которой заключается в проверке качества изображений и его повышения, если это возможно и необходимо;
- подсистема распознавания объектов, отвечающая за работу с обработанными изображениями для обнаружения стальковшей на них. В данной подсистеме реализован алгоритм из раздела 3;
- подсистема аналитики, внутри которой реализованы алгоритмы из разделов 2 и 4, являющиеся основной частью системы слежения и формирующие необходимый конечный результат.

Технические характеристики внешних серверов не описываются, поскольку требования к серверу видеонаблюдения зависят в большей степени от производителя камер и/или готовых систем IP-видеонаблюдения, использующих эти видеокамеры [18]. Кроме того, при необходимости повышения надёжности работы системы и обеспечения её максимальной работоспособности может потребоваться создание резервного сервера с аналогичными характеристиками [19]. Резервный сервер осуществляет переключение и продолжение работы системы в случае выхода из строя или недоступности основного сервера приложений.

### Результаты и их обсуждение

Проверка работы алгоритмов осуществлялась на наборе изображений с нескольких камер на различных участках маршрута и на соответствующем наборе ретроспективных данных о технологическом процессе. Порядок проверки алгоритмов соответствовал порядку, указанному в обобщённом алгоритме обработки информации в системе слежения за стальковшами. Поскольку одним из наиболее важных алгоритмов является алгоритм определения положения стальковша, далее приведены результаты его проверки. Проверялись корректность определения позиции стальковша в кадре как по координатам, так и по размерам описывающего прямоугольника в кадре, кроме того, оценивалась корректность классификации объекта и корректность трекинга, в табл. 1 приведены 30 тестовых примеров.

**Таблица 1.** Результаты экспериментальной проверки алгоритма определения положения стalkerовша на маршруте перемещения стalkerовшей**Table 1.** Results of experimental verification of the algorithm for determining the position of the stalker on the route of movement of the stalker

№	Стальковш в кадре / Stalkovsh in the frame		Класс найденного объекта / class of the found object		IoU	Трекинг
	факт / fact	алгоритм / algorithm	факт / fact	алгоритм / algorithm		
1	+	+	topkovsh	topkovsh	0,75	+
2	+	+	topkovsh	topkovsh	0,72	+
3	+	+	topkovsh	topkovsh	0,69	+
4	+	+	firekovsh	firekovsh	0,68	+
5	+	+	firekovsh	firekovsh topkovsh	0,85 0,31	+
6	+	+	movekovsh	movekovsh	0,81	+
7	+	+	movekovsh	movekovsh	0,76	+
8	+	+	movekovsh	movekovsh	0,83	+
9	-	-	-	-	-	-
10	+	-	firekovsh	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	+	+	movekovsh	movekovsh	0,59	+
13	-	+	-	movekovsh	-	-
14	+	+	clearkovsh	clearkovsh	0,73	+
15	+	+	clearkovsh	clearkovsh	0,74	+
16	+	+	clearkovsh	movekovsh	0,70	-
17	+	+	movekovsh	movekovsh	0,72	+
18	+	+	movekovsh	movekovsh	0,75	+
19	+	+	firekovsh	firekovsh	0,59	+
20	+	+	firekovsh	firekovsh	0,75	+
21	+	+	firekovsh	firekovsh	0,83	+
22	+	+	firekovsh	firekovsh	0,90	+
23	+	+	firekovsh	firekovsh	0,91	+
24	+	+	firekovsh	firekovsh	0,89	+
25	+	+	firekovsh	firekovsh	0,79	+
26	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-
28	+	+	topkovsh	topkovsh	0,71	+
29	+	+	topkovsh	topkovsh	0,83	+
30	+	+	topkovsh	topkovsh	0,8	+

В результате проверки были зафиксированы случаи двойного детектирования объекта разными классами. Подобные случаи не являются ошибочными или критичными, поскольку такие классы, как, например, `topkovsh` и `firekovsh`, соответствующие верхней части ковша и полного ковша не являются взаимоисключающими и при некоторых ракурсах могут детектироваться одновременно. Для устранения ситуаций подобного рода был реализован фильтр, выбирающий из нескольких объектов в одной области тот, значение параметра `confidence` которого максимально.

### Выводы

В рамках решения научно-технической задачи была разработана система алгоритмов слежения за стальковшами, которая позволяет определять

положение каждого из стальковшей, используемых в технологическом процессе производства стали. Результат работы системы слежения за стальковшами может быть в дальнейшем использован в системе планирования производства, которая рассчитывает оптимальный график задувок, позволяя минимизировать суммарное время нахождения плавки в цехе, за счёт чего уменьшается время, необходимое на её подогрев. Кроме того, включение в систему слежения тепловизоров потенциально позволит в режиме реального времени контролировать температуру брони стальковша. По температуре брони можно судить о состоянии стальковша следующим образом: чем выше температура, тем выше износ футеровки и выше вероятность прогара ковша в течение всего времени нахождения жидкой стали в нем.

### Список литературы

1. Глебова Е.С., Блинников А.А., Быстров С.В. Применение каскадного кодирования для решения задачи маркирования сталеразливочного ковша // Проблемы и достижения в науке и технике: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Омск, 2016. № 3. С. 41-44.
2. Пространственная реконструкция в системах компьютерного зрения на основе web-камер / А.В. Атанов, А.А. Крыловецкий, С. Д. Кургалин, С.И. Протасов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2011. № 2. С. 149-153.
3. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н., Локтев А.А. Моделирование комплексной системы видеомониторинга внутри здания. Ч. 1. Алгоритм размещения видеокамер и его программная реализация // Вестник МГСУ. 2012. №5. С. 84-92.
4. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н., Локтев А.А. Моделирование комплексной системы видеомониторинга внутри здания. Ч. 2. Алгоритм распознавания объектов // Вестник МГСУ. 2012. №5. С. 124-131.

5. Петричкович Я. Я., Сомиков В. П., Юдинцев В.А. Анализируем системы видеоаналитики. Ч. 2. "Системы безопасности". 2009. №3. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/ip-security/analiziruem-sistemy-videoanalitiki>

6. D. Gordon, A. Kembhavi, M. Rastegari, J. Redmon, D. Fox, A. Farhadi, IQA: Visual Question Answering in Interactive Environments. (2018)

7. Еременко В.Т., Тютякин А.В., Кондрашин А. А. Методологические аспекты обработки изображений в автоматизированных системах диагностики // Информационные системы и технологии. 2011. №2(64). С. 19-26

8. Статья от компании Axis – лидера на рынке сетевого видео, о проблемах распознавания и идентификации на изображениях. URL: <https://www.axis.com/ru-ru/learning/web-articles/identification-and-recognition/resolution>

9. Angella F., Reithler L., Gallesio F. Optimal Deployment of Cameras for Video Surveillance Systems // IEEE Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance. - 2007.

10. Simon J. D. Prince Computer Vision: Models, Learning, and Inference. Prince. Cambridge University Press, 2012. 598 p.

11. An intelligent vision-based vehicle detection and tracking system for automotive applications / Y.M. Tsai, et al. // Proceedings of the IEEE International Conference on Consumer Electronics. 2011. P. 113-114.

12. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Шубин Н.Ю. Алгоритм измерения координат движущихся объектов в последовательности изображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. Вып. 34. С. 32-36.

13. Провоторов А. В., Орлов А. А., Астафьев А. В. Системный анализ технологий и систем идентификации трубопроводной продукции по маркеру в условиях промышленного производства // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы VIII научно-практической конференции». Тольятти, 2011. С. 187-195.

14. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Шубин Н.Ю. Алгоритм оценки координат объектов на основе преобразования Радона // Цифровая обработка сигналов. 2011. №3. С. 17-20.

15. Волхонский Г.В. Критерии выбора разрешающей способности в системах теленаблюдения // PROSystem CCTV. 2009. № 2 (38), С. 60 - 64.

16. Трофименко Я.М., Математическое обеспечение системы слежения за стальковшами в сталеплавильном производстве // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2021): материалы двенадцатой заочной международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 169-173. ISBN 978-5-87851-968-7

17. Якушев А.М. Проектирование сталеплавильных и доменных цехов. М.: Металлургия, 1984. 216 с.

18. Видеонаблюдение по IP // Журнал сетевых решений/LAN. 2010. № 04. URL: <https://www.osp.ru/lan/2010/04/13002109/>

19. Зайцев Е.М., Коломиец Е.А., Николаев В. Н. Формализация этапов жизненного цикла создания геоинформационной продукции на научно-производственном предприятии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 146-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>

## References

1. Glebova E.S., Blinnikov A.A., Bystrov S.V. [Cascade coding application for the solving of steel-pouring ladle marking problem]. *Problemy i dostizheniya v nauke i tekhnike. Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Problems and achievements in science and technology. Collection of scientific papers based on the results of an international scientific and practical conference]. Omsk, 2016, no. 3, pp. 41-44 (In Russ.).

2. Atanov A.V., Krylovetskii A.A., Kurgalin S. D., Protasov S.I. Prostranstvennaya rekonstruktsiya v sistemakh komp'yuternogo zreniya na osnove web-kamer [Spatial reconstruction in computer vision systems based on webcams]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series. System Analysis and Information Technology*, 2011, no. 2, pp. 149-153.

3. Loktev D.A., Alfimtsev A.N., Loktev A.A. Modelirovanie kompleksnoi sistemy videomonitoringa vnutri zdaniya. Chast' 1. Algoritm razmeshcheniya videokamer i ego programnaya realizatsiya [Simulation of an integrated video monitoring system inside a building. Part 1. Algorithm for placing video cameras and its software implementation]. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*, 2012, no. 5, pp. 84-92.

4. Loktev D.A., Alfimtsev A.N., Loktev A.A. Modelirovanie kompleksnoi sistemy videomonitoringa vnutri zdaniya. Chast' 2. Algoritm raspoznavaniya ob"ektov [Simulation of an integrated video monitoring system inside a building. Part 2. Object recognition algorithm]. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*, 2012, no.5, 2012, pp. 124-131.

5. Petrichkovich Ya. Ya., Somikov V. P., Yuditsev V.A. Analiziruem sistemy videoanalitiki. Chast' 2. "Sistemy bezopasnosti" [Video analytics systems analyze. Part 2. "Security systems "]. 2009, no. 3. Available at: <http://lib.secuteck.ru/articles2/ip-security/analiziruem-sistemy-videoanalitiki>

6. Gordon D., Kembhavi A., Rastegari M., Redmon J., D Fox., Farhadi A., IQA: Visual Question Answering in Interactive Environments. (2018)

7. Eremenko V.T., Tyutyakin A.V., Kondrashin A. A. Metodologicheskie aspekty obrabotki izobrazhenii v avtomatizirovannykh sistemakh diagnostiki [Methodological aspects of image processing in automated diagnostic systems]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*, 2011, no.2(64), pp. 19-26.

8. Stat'ya ot kompanii Axis – lidera na rynke setevogo video, o problemakh raspoznavaniya i identifikatsii na izobrazheniyakh [An article from Axis, a leader in the network video market, about the problems of recognition and identification in images]. Available at: <https://www.axis.com/ru-ru/learning/web-articles/identification-and-recognition/resolution>

9. Angella F., L Reithler., Gallesio F. Optimal Deployment of Cameras for Video Surveillance Systems [Optimal Deployment of Cameras for Video Surveillance Systems]. *IEEE Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 2007.

10. Simon J. D. Prince Computer Vision: Models, Learning, and Inference. Cambridge University Press, 2012. 598 p.

11. Tsai Y.M. et al. An intelligent vision-based vehicle detection and tracking system for automotive applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 2011, pp. 113-114.

12. Alpatov B.A., Balashov O.E., Shubin N.Yu. Algoritm izmereniya koordinat dvizhushchikhsya ob"ektov v posledovatel'nosti izobrazhenii [Moving objects coordinate measuring on a sequence of images algorithm]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2010, is. 34, pp. 32-36.

13. Provotorov A. V., Orlov A. A., Astafev A. V. [System analysis of technologies and systems for pipeline products identification by marker in industrial production]. *Materialy VIII nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tatishchevskie chteniya: aktual'nye problemy nauki i praktiki»* [Materialy VIII nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tatishchev Readings: Actual Problems of Science and Practice"]. Tolyatti, 2011, pp. 187-195 (In Russ.).

14. Alpatov B.A., Babayan P.V., Shubin N.Yu. Algoritm otsenki koordinat ob"ektov na osnove preobrazovaniya Radona [Object coordinates estimation algorithm based on Radon Transform]. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*, 2011, no.3, pp. 17-20.

15. Volkhonskii G.V. Kriterii vybora razreshayushchei sposobnosti v sistemakh tel-enablyudeniya [Resolution choosing in television surveillance systems criteria]. *PROSystem CCTV*, 2009, no. 2 (38), pp. 60 - 64.

16. Trofimenko Ya.M. [Mathematical support of the tracking system for steel ladles in steelmaking]. *Intellektual'no-informatsionnye tekhnologii i intellektual'nyi biznes (INFOS-2021)*. *Materialy dvenadtsatoi zaochnoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Intelligent information technologies and intellectual business (INFOS-2021). Materials of the twelfth correspondence international scientific and technical conference]. Vologda, 2021, pp. 169-173 (In Russ.).

17. Yakushev A.M. *Proektirovanie staleplavil'nykh i domennykh tsekhov* [Design of steelmaking plants and blast-furnace plants]. Moscow, Metallurgy Publ., 1984, 216 p.

18. Videonablyudenie po IP [IP video surveillance]. *Zhurnal setevykh reshenii/LAN = Network solutions magazine/LAN*, 2010, № 04. Available at: [https:// www.osp.ru/lan/2010/04/13002109/](https://www.osp.ru/lan/2010/04/13002109/)

19. Zaitsev E. M., Kolomiets E. A., Nikolaev V. N. Formalization of Life Cycle Stages of Geographic Information Products Creation at Research and Production Enterprises. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 146-165 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Трофименко Ярослав Максимович**, аналитик данных, Общество с ограниченной ответственностью «Северсталь Диджитал», г.Москва, Российская Федерация, e-mail: [trofimenko.y.m@yandex.ru](mailto:trofimenko.y.m@yandex.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9286-5340>

**Yaroslav M. Trofimenko**, Data Scientist, «Severstal Digital» LLC (limited liability company), Moscow, Russian Federation, e-mail: [trofimenko.y.m@yandex.ru](mailto:trofimenko.y.m@yandex.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9286-5340>

**Ершов Евгений Валентинович**, доктор технических наук, профессор, Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация, e-mail: [evershov@chsu.ru](mailto:evershov@chsu.ru)

**Evgenii V. Ershov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation, e-mail: [evershov@chsu.ru](mailto:evershov@chsu.ru)

**Варфоломеев Игорь Андреевич**, кандидат технических наук, доцент, Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация, e-mail: [igor.varf@gmail.com](mailto:igor.varf@gmail.com)

**Igor' A. Varfolomeev**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Education Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation, e-mail: [igor.varf@gmail.com](mailto:igor.varf@gmail.com)

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-75-87>

## Алгоритм управления движением исполнительного механизма прибора для активно-пассивной механотерапии голеностопного сустава

А.А. Князев <sup>1</sup> ✉, А.В. Федоров <sup>1</sup>, А.С. Яцун <sup>1</sup>

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

✉ e-mail: ak290599@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Статья посвящена разработке алгоритма управления движением управляемой мобильной платформы аппарата пассивной механотерапии голеностопного сустава. Одной из наиболее распространенных травм, получаемых человеком, является повреждение голеностопного сустава при выполнении спортивных, бытовых, производственных упражнений, а также в результате автомобильных аварий. Падение с высоты с приземлением на ноги, в том числе при выполнении прыжков с парашютом, также часто приводит к травмированию голеностопного сустава. Для увеличения эффективности реабилитации, как правило, применяется механотерапия. Актуальность темы связана с высокой эффективностью роботизированных устройств реабилитации, которые, благодаря обратным связям и управляемым электроприводам могут выполнять движения нижних конечностей оптимальным способом.

**Методы.** Разработана структурная схема системы управления прибором. В предложенном алгоритме для вычисления управляющих напряжений применяется стратегия распараллеливания управляющих воздействий с применением корректирующих эталонных управлений. Наличие системы силомоментного очувствления позволяет оценить изменение величины реакции во времени и своевременно зафиксировать момент возникновения спастических эффектов, контрактуры мышц и автоматически произвести изменение законов движения стопы с целью исключения травматизации пациента и устранения болевого синдрома.

**Результаты.** Предложена методика построения желаемой зависимости углов поворота стопы от времени в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Разработаны алгоритм работы блока задания законов движения и принятия решений, алгоритм формирования управляющих напряжений по эталонной модели, алгоритм работы блока корректировки напряжений, а также алгоритм работы блока корректировки эталонной модели. В результате проведенных виртуальных тестов на математической модели прибора были получены основные закономерности движения исполнительного механизма в виде зависимостей угла поворота платформы от времени.

**Заключение.** Результаты тестирования устройства показывают, что управление движением исполнительного механизма прибора для активно-пассивной механотерапии голеностопного сустава при помощи описанных в работе алгоритмов целесообразно.

**Ключевые слова:** механотерапия голеностопного сустава; спастические эффекты и контрактура мышц; алгоритм управления устройством; формирование управляющих напряжений; корректировка напряжений.

© Князев А.А., Федоров А.В., Яцун А.С., 2022

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

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-21-00464 – «Разработка моделей и алгоритмов управления биотехническими шагающими системами».

**Для цитирования:** Князев А.А., Федоров А.В., Яцун А.С. Алгоритм управления движением исполнительного механизма прибора для активно-пассивной механотерапии голеностопного сустава // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 75-87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-75-87>.

Поступила в редакцию 30.06.2022

Подписана в печать 24.08.2022

Опубликована 14.10.2022

## Algorithm for Controlling the Movement of the Actuator of the Device for Active-Passive Mechanotherapy of the Ankle Joint

Andrei A. Knyazev <sup>1</sup> ✉, Andrei V. Fedorov <sup>1</sup>, Andrei S. Yatsun <sup>1</sup>

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

✉ e-mail: ak290599@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The article is devoted to the development of an algorithm for controlling the movement of a controlled mobile platform of a passive mechanotherapy ankle joint apparatus. One of the most common injuries sustained by humans is damage to the ankle joint in sports, domestic, industrial exercises, and as a result of car accidents. Falls from heights with a landing on the feet, including parachute jumps, also often result in ankle injuries. In order to increase the effectiveness of rehabilitation, mechanotherapy is usually used. The relevance of the topic is related to the high efficiency of robotic rehabilitation devices, which, thanks to back-linking and electrically controlled actuators, can perform lower limb movements in an optimal way.

**Methods.** The structural diagram of the device control system has been developed. The proposed algorithm uses the strategy of paralleling control actions with the use of corrective and reference controls to calculate control voltages. Presence of force-moment feeling system enables to estimate change of reaction value in time and timely fix the moment of spastic effects appearance, muscle contracture and automatically make changes in foot movement laws in order to exclude patient's traumatization and pain syndrome elimination.

**Results.** A methodology for constructing the desired dependence of foot rotation angles on time in the sagittal and frontal planes is proposed. We have developed an operating algorithm for the laws of motion and decision-making block, an algorithm for generating control voltages from the reference model, an operating algorithm for the voltage correction block, and an operating algorithm for the reference model correction block. As a result of virtual tests on the mathematical model of the device, we obtained the basic patterns of motion of the actuator in the form of dependences of the rotation angle of the platform from the time.

**Conclusion.** The results of testing the device show that controlling the movement of the actuator for active-passive mechanotherapy of the ankle joint using the algorithms described in the article is reasonable.

**Keywords:** ankle mechanotherapy; spastic effects and muscle contracture; device control algorithm; control voltage generation; voltage correction.

**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 supported by the grant of the Russian Science Foundation 22-21-00464 – "Development of models and algorithms for controlling biotechnical walking systems".

**For citation:** Knyazev A. A., Fedorov A. V., Yatsun A. S. Algorithm for Controlling the Movement of the Actuator of the Device for Active-Passive Mechanotherapy of the Ankle Joint. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 75-87 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-75-87>.

Received 30.06.2022

Accepted 24.08.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

## Введение

Среди травм нижних конечностей наиболее распространёнными являются травмы дистального отдела голени и лодыжек, которые по данным литературы составляют от 12,0 до 20,0 % от всех переломов опорно - двигательного аппарата (ОДА) (В.М. Волков, 1998, Л.У. Дыхне, 1991), из них в 12-39,8% случаев наблюдаются неудовлетворительные исходы лечения, а длительная нетрудоспособность составляет от 4 до 8 месяцев [1-5]. Одной из наиболее распространенных травм, получаемых человеком, является повреждение голеностопного сустава при выполнении спортивных, бытовых, производственных упражнений, а также в результате автомобильных аварий. Падение с высоты с приземлением на ноги, в том числе при выполнении прыжков с парашютом, также часто приводит к травмированию голеностопного сустава [6-8]. По статистике более половины травм нижних конечностей и около 40% суставных травм составляют травмы голеностопного сустава. Также известно, что 54% переломов и переломо-вывихов голеностопного сустава случаются в молодом возрасте, когда человеку важно сохранять трудоспособность. После травмы происходит длительный процесс лечения и реабилитации, в том числе, после хирургического

вмешательства, реабилитация может быть осложнена длительной неподвижностью сустава [9-11]. Даже при качественном лечении, травмы голеностопа приводят к инвалидности в 10-12% случаев. Поэтому восстановление функций голеностопного сустава требует индивидуального подхода для каждого пациента. Для того, чтобы снизить процент осложнений широко применяется метод непрерывного пассивного движения (НПД). Для его реализации последние годы появляются медицинские приборы механотерапии, позволяющие ускорить процесс восстановления больного [12-15]. Особенно эффективными оказываются роботизированные устройства реабилитации, которые, благодаря обратным связям и управляемым электроприводам могут выполнять движения нижних конечностей оптимальным способом [16]. Создание таких приборов требует глубокой проработки теории взаимодействия человека и механизма, создания человеко-машинных интерфейсов, математических моделей и алгоритмов управления, обеспечивающих заданные показатели качества. В статье рассмотрены вопросы исследования, разработки и создания алгоритмов управления, обеспечивающих заданные показатели качества для роботизированных аппаратов посттравматической ре-

билитации голеностопного сустава человека [17-19].

### Материалы и методы

На рис.1 приведена схема прибора активно-пассивной механотерапии голеностопного сустава (АПМГС). Здесь обозначено: 1 – голень; 2 – манжета прибора; 3,4,5 – линейные электропри-

воды; 6 – стопа пациента; 7 – верхняя платформа сендвича; 8 – нижняя платформа сендвича; 9 – измеритель силы.

За счет изменения длин приводов, можно изменять положение платформы, соответственно, и стопы пациента. Шарниры  $A_1, A_2, A_3$  и  $B_1, B_2, B_3$  связывают линейные приводы с платформами сендвича и манжетой голени.

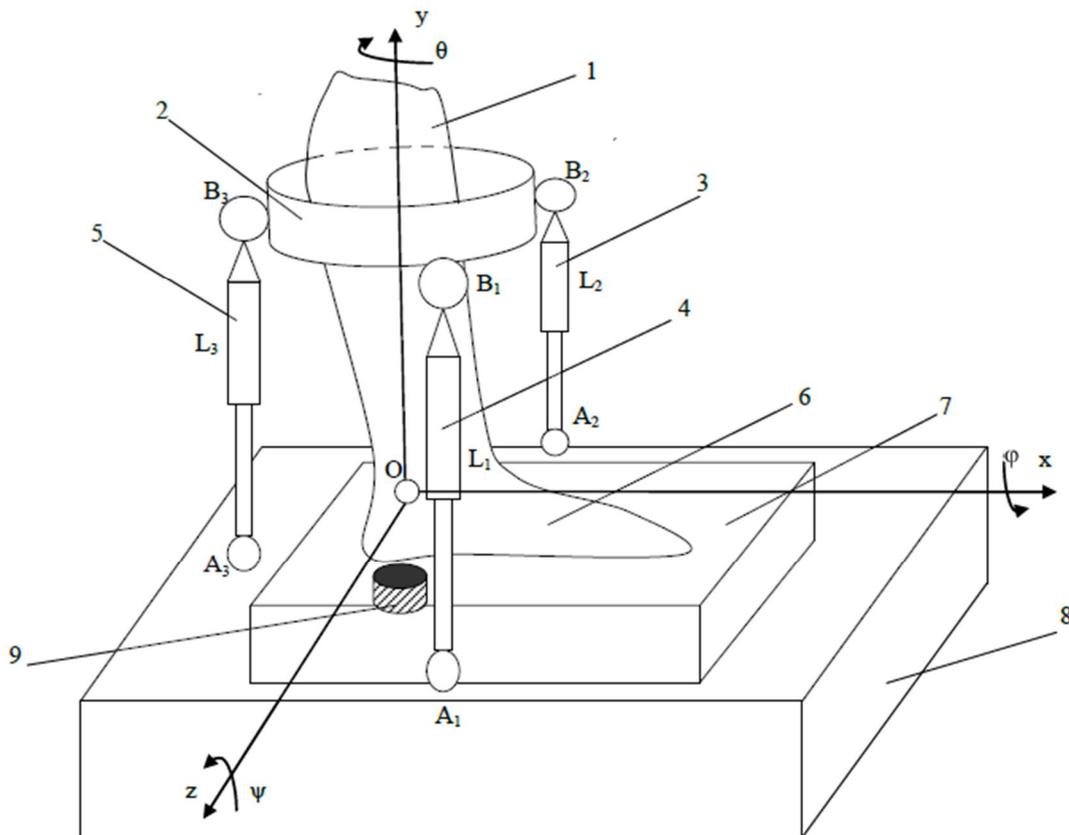


Рис. 1. Схема прибора АПМГС

Fig. 1. Schematic diagram of the APMGS device

Оси вращения платформ должны совпадать с осью вращения голеностопного сустава в сагиттальной, фронтальной плоскостях. Важно, чтобы в любой момент времени мгновенная ось вращения мобильной платформы проходила через заданную точку  $O$ , определяемую физиологическими особенностями голеностопного сустава (точка

контакта вилки берцовых и таранной костей) [20]. Примем, что  $\varphi(t)^*, \psi(t)^*$  являются углами, определяющими поворот платформы в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Проведенный кинематический анализ позволяет решить, как прямую (ПЗК), так и обратную задачи кинематики (ОЗК), а также

сформулировать задачу о планировании допустимых траекторий движения мобильной платформы, обеспечивающих применение пространственных 3D траекторий мобильной платформы. На рис. 2 приведена структурная схема системы управления прибором.

Выбор врачом режима реабилитации определяет программу движений стопы пациента, формализованных в виде параметрических уравнений

$$\bar{\lambda}(t)^* = (\varphi(t)^*, \psi(t)^*)^T. \quad (1)$$

При выполнении условий  $\bar{\lambda}(t)^* < \bar{\lambda}(t_0)^*$ , где  $\bar{\lambda}(t_0)^*$  - область допустимых значений углов поворота. Важным, является контроль за состоянием мышечной системы пациента при выполнении упражнений. Наличие системы сило-моментного очувствления позволяет оценить изменение величины реакции во времени и своевременно зафиксировать момент возникновения спастических эффектов, контрактуры мышц и автоматически произвести изменение законов движения стопы с целью исключения травматизации пациента и устранения болевого синдрома. Поэтому, врач задает предельные значения реакции между стопой пациента и платформой сендвича  $R^*$ .

Наличие обратных связей позволяет определять отклонение реального положения платформы от заданного в виде вектора

$$\Delta\lambda = (\Delta\varphi(t), \Delta\psi(t))^T \quad (2)$$

и вектора силового взаимодействия  $\Delta R$ . Бортовой вычислитель (блок принятия

решений) решает обратную задачу кинематики (ОЗК) и определяет уровень управляющих напряжений

$$\bar{U} = (U_1, U_2, U_3)^T, \quad (3)$$

поступающих на линейные электроприводы, которые обеспечивают изменение длин

$$\bar{L}^* = (l_1, l_2, l_3)^T. \quad (4)$$

Положение платформы контролируется датчиками, определяющими текущие значения

$$\bar{\lambda}(t) = (\varphi(t), \psi(t))^T, \quad (5)$$

а также величину реакции  $R$ .

В соответствии со схемой осуществляется управление тремя электроприводами, обеспечивающими заданное движение стопы пациента. В качестве каналов обратных связей используются данные, регистрируемые датчиками углов поворота по соответствующим осям, а также показатели сило-моментных датчиков.

На рис. 3 приведен алгоритм работы блока задания законов движения и принятия решений. В разработанном алгоритме для вычисления управляющих напряжений применяется стратегия распараллеливания управляющих воздействий с применением корректирующих  $\bar{u}$  и эталонных управлений  $\bar{U}^*$ .

$$\bar{U} = \bar{U}^* + \bar{u}. \quad (6)$$

На рис. 4 показан алгоритм формирования управляющих напряжений по эталонной модели. На рис. 5 приведен алгоритм, иллюстрирующий формирование корректирующих напряжений.

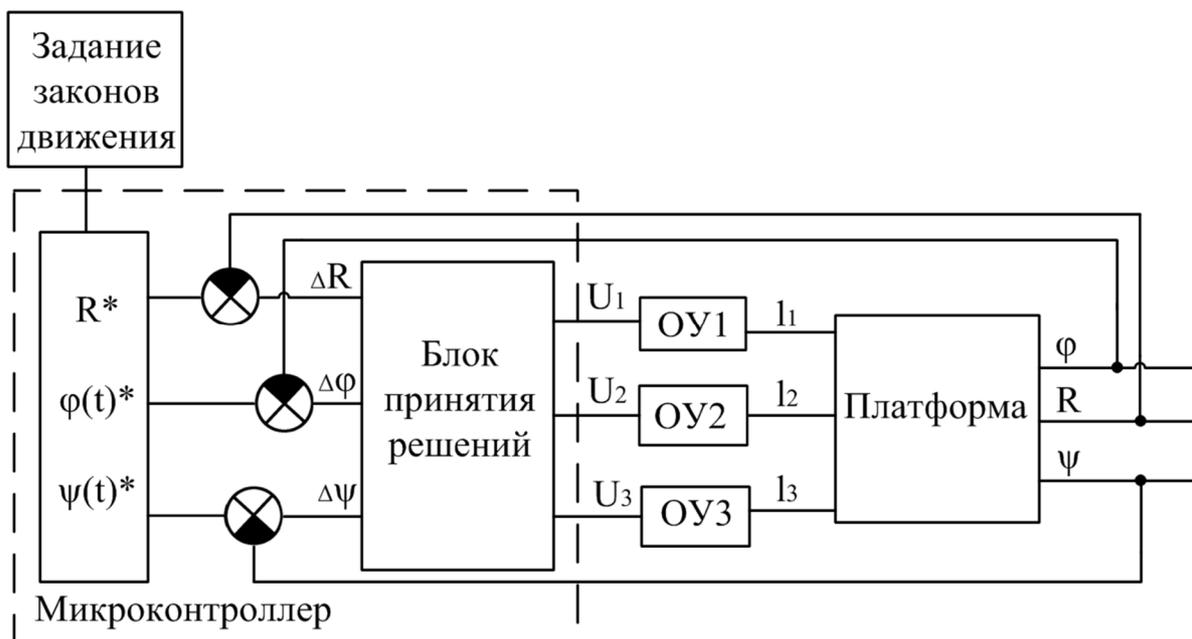


Рис. 2. Структурная схема системы управления прибором

Fig. 2. Schematic diagram of the appliance control system

Критерием качества работы локальных контуров САУ принят квадратичный интегральный критерий вида:

$$P_1 = \frac{1}{t} \int_0^{t_1} (\bar{L}^* - \bar{L})^2 dt. \tag{7}$$

**Результаты и их обсуждение**

На рис. 5 представлены зависимости углов поворота платформы от времени в сагиттальной плоскости.

На рисунке представлены следующие зависимости:  $\psi(t)$  – желаемый угол поворота платформы от времени;  $\psi_1(t)$  – угол поворота платформы от времени, рассчитанный с учетом корректирующего сигнала и эталонной модели;  $\psi_2(t)$  – угол поворота платформы от времени без учета эталонной модели

в алгоритме. В табл. 1 представлены относительные погрешности работы алгоритма.

Таблица 1. Относительные погрешности работы алгоритма

Table 1. Relative errors of the algorithm

С применением корректирующего сигнала в алгоритме / With the use of a correction signal in the algorithm	С применением корректирующего сигнала и эталонной модели в алгоритме / With the use of a correction signal and a reference model in the algorithm
22%	5%

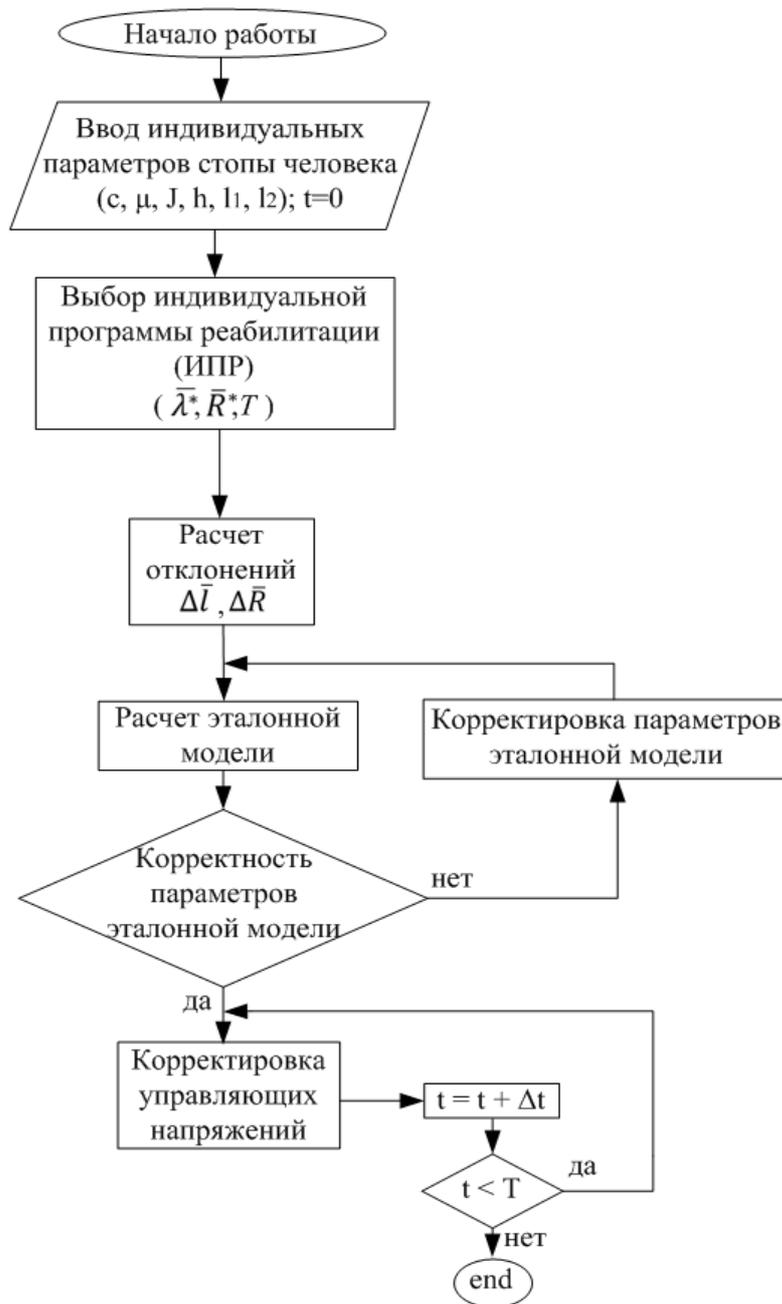


Рис. 3. Алгоритм блока управления

Fig. 3. Control unit algorithm

Желаемая зависимость угла поворота в сагиттальной плоскости от времени представлена в виде полинома пятого порядка  $\psi^*(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i$ ; значения угловой скорости вычисляются по фор-

муле:  $\dot{\psi}^*(t) = \sum_{i=0}^5 a_i i t^{i-1}$  и ускорения

$\ddot{\psi}^*(t) = \sum_{i=0}^5 a_i i(i-1) t^{i-2}$ . Постоянные  $a_i$

определяются из граничных условий:

$t=0; \psi(0)=\psi_0; \dot{\psi}(0)=0; \ddot{\psi}(0)=0$  и, при  $t=T; \psi(T)=\psi_k; \dot{\psi}(0)=0; \ddot{\psi}(0)=0$ .

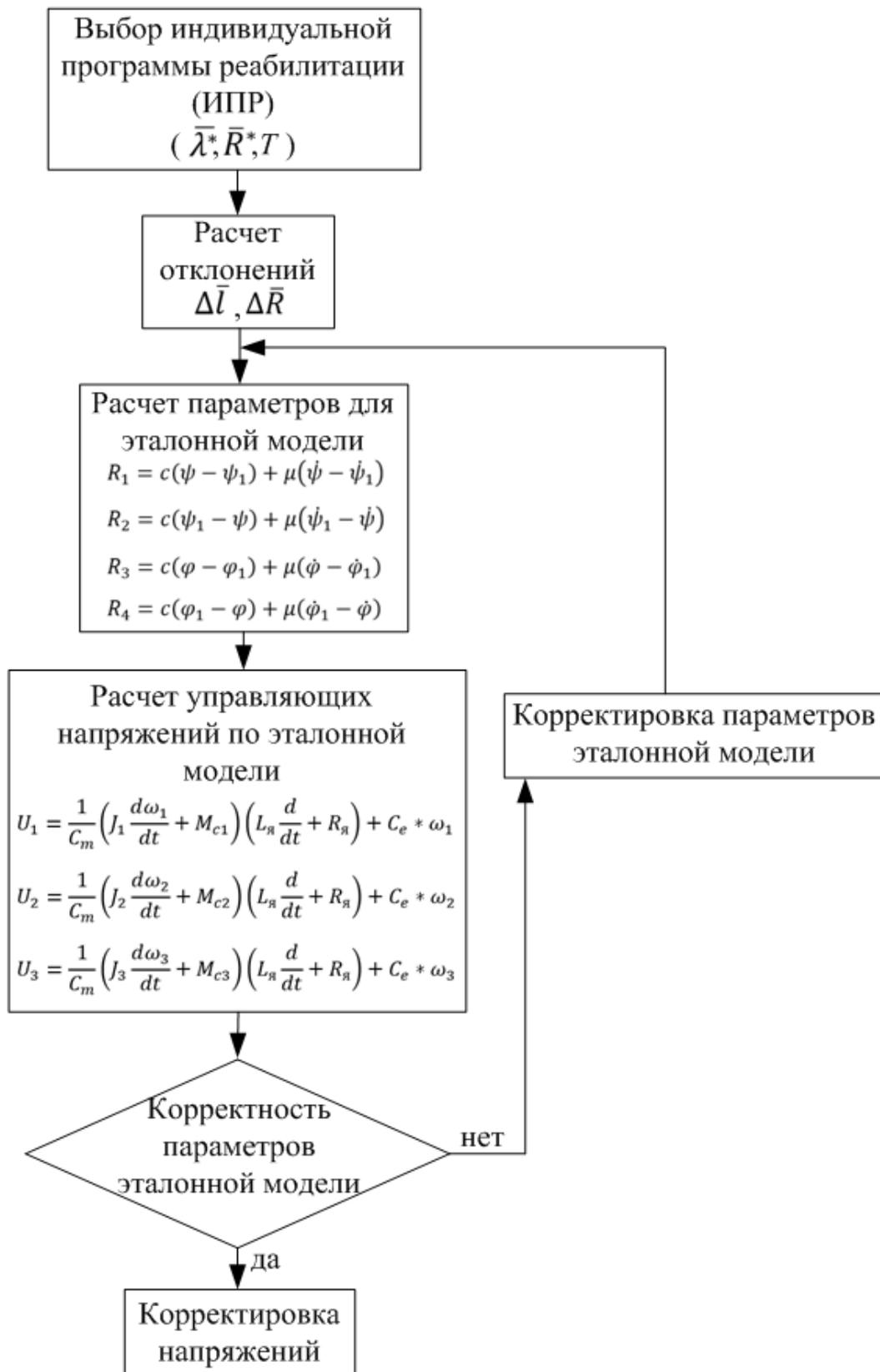


Рис. 4. Алгоритм работы блока расчета управляющих напряжений по эталонной модели

Fig. 4. Algorithm of the control voltage calculation block using the reference model

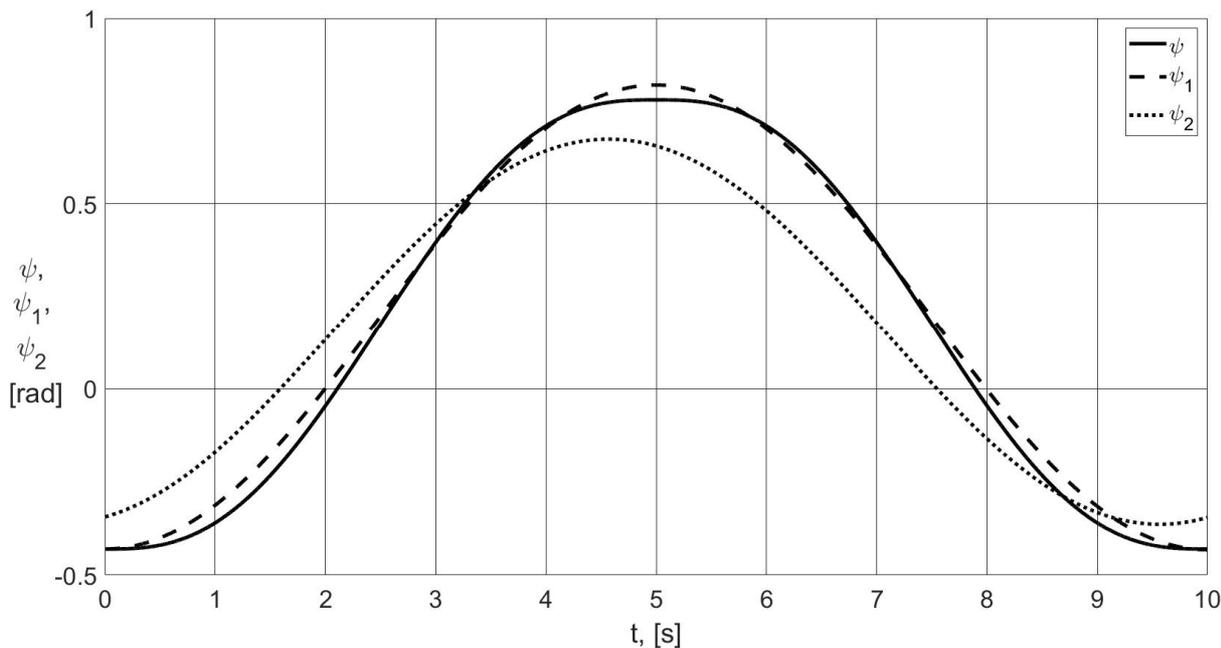


Рис. 5. Зависимости углов поворота платформы от времени в сагиттальной плоскости

Fig. 5. Dependences of platform rotation angles on time in the sagittal plane

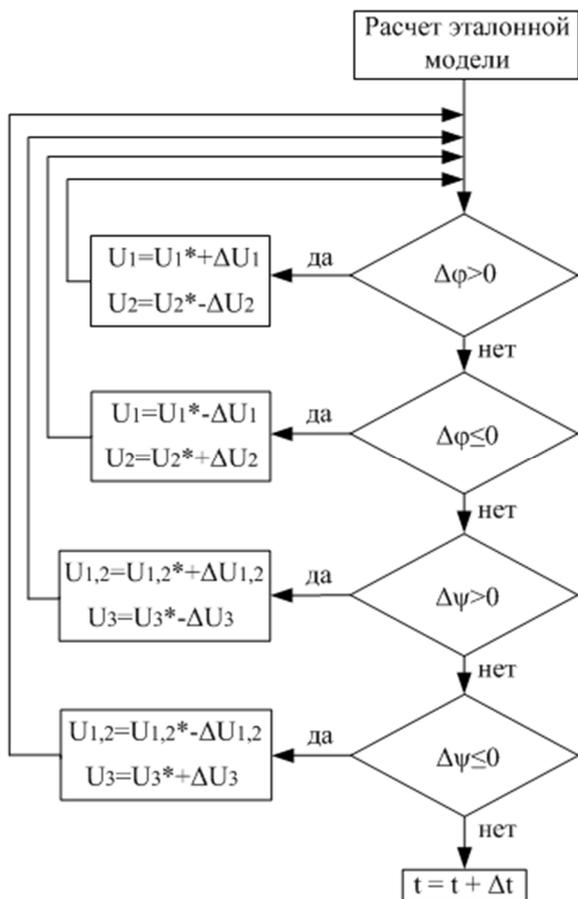


Рис. 6. Алгоритм работы блока корректировки напряжений

Fig. 6. Algorithm of the voltage correction unit

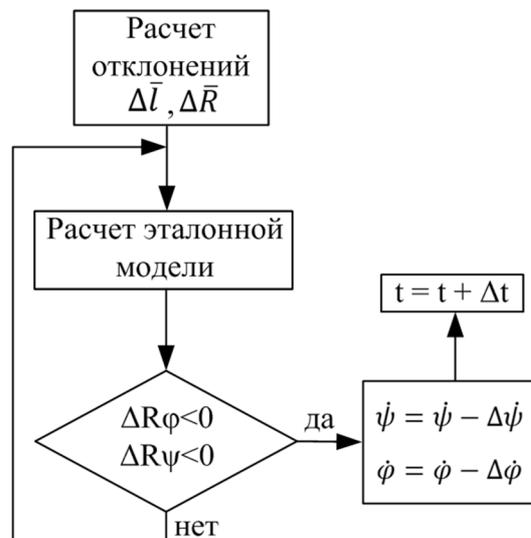


Рис. 7. Алгоритм работы блока корректировки эталонной модели

Fig. 7. Algorithm of the reference model correction unit

**Выводы**

Разработан алгоритм управления движением управляемой мобильной платформы аппарата пассивной меха-

нотерапии голеностопного сустава. Разработана структурная схема системы управления прибором. В предложенном алгоритме для вычисления управляющих напряжений применяется стратегия распараллеливания управляющих воздействий с применением корректирующих и эталонных управлений. Предложена методика построения желаемой

зависимости угла поворота стопы от времени в сагиттальной плоскости и фронтальной плоскостях. Наличие обратных связей сило-моментного взаимодействия позволяет учитывать состояние пациента (степень спастичности мышечной системы) при формировании управляющих напряжений.

### Список литературы

1. Математическое моделирование ходьбы человека в реабилитационном экзоскелете с помощью метода видеоанализа походки / А. С. Печурин, А. В. Федоров, А. С. Яцун, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 27-40. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>.
2. Моделирование экзоскелета с гибридным линейным гравитационным компенсатором / А.Е. Карлов, А.А. Постольный, А.В. Федоров, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 66-78. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-66-78>.
3. Studying the Two-Legged Walking System with Video Capture Methods / A. S. Pechurin, S. F. Jatsun, A. V. Fedorov, A. S. Jatsun // In Climbing and Walking Robots Conference 2021. Pp. 3-12. Springer, Cham.
4. Simulation of Static Walking in an Exoskeleton. Electromechanics and Robotics / S. Jatsun, A. Yatsun, A. Fedorov, E. Saveleva // Springer, Singapore. P. 49-60
5. Jatsun S.F, Fedorov A.V., Yatsun A.S. Models and algorithms of control system of active-passive mechanotherapeutic device. RusAutoCon, 2022, Russia, pp.129-135.
6. Дмитриев В. А., Фёдоров А. В., Аль М. Х. Х. Анализ качественных показателей промышленного экзоскелета на основе комплекса критериев // Вопросы методологии естествознания и технических наук: современный контекст. Белгород, 2019. С.131-135.
7. Распределение энергозатрат в системе человек-экзоскелет / В. М. Антипов, А. Е. Карлов, А. В. Фёдоров, М. Х. Х. Аль // Вопросы методологии естествознания и технических наук: современный контекст. Белгород, 2019. С.109-112.
8. Фёдоров А. В. Анализ качественных показателей аппарата для пассивной механотерапии голеностопного сустава на основе комплекса критериев // Инноватика в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития: сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции (Шифр К-276). Уфа, 2022. С.20-24.

9. Князев А. А. Компьютерное моделирование реабилитационного комплекса с применением по «MATLAB/SIMULINK» // *Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: 2-я Всероссийская научная конференция перспективных разработок*. Курск, 2022. С. 70.
10. New Approaches to Rehabilitation of the Ankle Joint Using a Mechanotherapeutic Apparatus / S.M. Jatsun, A.S. Jatsun, A.N. Rukavitsyn, E.N. Politov et al. // *BiomedEng*. 2018. 52. 37–41.
11. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Korenevskiy N. Experience in the Development of Rehabilitation Exoskeletons // *Biomedical Engineering*. 2017. Т. 51. № 3.
12. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Rukavitsyn A.N. Designing a Mechanotherapy Device for Rehabilitation of Lower Extremities of Humans // *Biomed Eng*. 2016. 50; 128–133.
13. Jamwal P., Hussain S., Xie S. Restage design analysis and multicriteria optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using genetic algorithm // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2014. Vol. 12. № 4. P. 1433–1446.
14. Design and kinematic analysis of redundantly actuated parallel mechanisms for ankle rehabilitation / C. Wang, Y. Fang, S. Guo, and C. Zhou // *Robotica*. 2015. Vol.33. № 2. P. 366–384,
15. A New Type of Ankle-Foot Rehabilitation Robot Based on Muscle Motor Characteristics / D. Zeng, H. Wu, X. Zhao, W. Lu, XuelinLuo // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. P. 189-195.
16. Altering gait variability with an ankle exoskeleton / P. Antonellis, S. Galle, D. D. Clercq, P. Malcolm // *PLoS One*. 2018. Vol. 13, № 10, Art.no. e0205088.
17. Cervantes-Sánchez. Robot-assisted ankle rehabilitation: a review, disability and rehabilitation / Marian G. Alvarez-Perez, Mario A. Garcia-Murillo, J. Jesús // *Assist Technol*. 2020;15(4):394–408.
18. Design and Workspace Analysis of a Parallel Ankle Rehabilitation Robot (PARR) / L. Zhang, J. Li, M. Dong. et al. // *Journal of Healthcare Engineering*. Vol. 2019, Article ID 4164790, 10 pages.
19. Jamwal P.K., Xie S., Aw K.C. Kinematic design optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified genetic algorithm // *Robot Autonom Syst*. 2009;57(10):1018–27.
20. Vallés Marina, Casalilla José, Valera Ángel, et al. A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation // *Robotica*. 2017; 35:1939–57.

## References

1. Pechurin A. S., Fedorov A. V., Jatsun A. S., Jatsun S. F. Mathematical Modeling of Human Gait in a Rehabilitation Exoskeleton Using Gait Video Analysis Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 27-40 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>.

2. Karlov A. E., Postolny A.A., Fedorov A.V., Jatsun S. F. Simulation of an Exoskeleton with a Hybrid Linear Gravity Compensator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 66-78 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-66-78>.

3. Pechurin A. S., Jatsun S. F., Fedorov A. V., Jatsun A. S. Studying the Two-Legged Walking System with Video Capture Methods. In *Climbing and Walking Robots Conference, 2021*, pp. 3-12. Springer, Cham.

4. Jatsun S., Yatsun A., Fedorov A., Saveleva E. (2022). Simulation of Static Walking in an Exoskeleton. *Electromechanics and Robotics, 2022*, pp. 49-60. Springer, Singapore.

5. Jatsun S.F., Fedorov A.V., Yatsun A.S, Models and algorithms of control system of active-passive mechanotherapeutic device. RusAutoCon, 2022, Russia, pp.129-135.

6. Dmitriev V. A., Fedorov A. V., Al M. H. [Analysis of industrial exoskeleton qualitative performance based on a set of criteria]. *Voprosy metodologii estestvoznaniya i tekhnicheskikh nauk: sovremenniy kontekst* [Issues in the methodology of natural and technical sciences: contemporary context]. Belgorod, 2019, pp.131-135 (In Russ.).

7. Antipov V. M., Karlov A. E., Fedorov A. V., Al M. H. H. [Energy distribution in the human-exoskeleton system]. *Voprosy metodologii estestvoznaniya i tekhnicheskikh nauk: sovremenniy kontekst* [Issues in the methodology of natural science and engineering: contemporary context]. Belgorod, 2019, pp.109-112 (In Russ.).

8. Fedorov A. V. [Analysis of quality indicators of ankle passive mechanotherapy device based on a set of criteria]. *Sbornik nauchnykh statei po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Innovatika v sovremennom mire: opyt, problemy i perspektivy razvitiya"* [Collection of scientific papers on proceedings of International scientific-technical conference "Innovatika in modern world: experience, problems and perspectives of development"]. Ufa, 2022, pp.20-24 (In Russ.).

9. Knyazev A. A. [Computer simulation of rehabilitation complex using MATLAB/SIMULINK]. *2-ya Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya perspektivnykh razrabotok Innovatsionnyi potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh* [The 2nd All-Russian Scientific Conference of Advanced Developments Innovative potential of society development: a look at young scientists]. Kursk, 2022, 70 p. (In Russ.).

10. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Rukavitsyn A.N., Politov E.N. et al. New Approaches to Rehabilitation of the Ankle Joint Using a Mechanotherapeutic Apparatus. *BiomedEng*, 2018, 52, 37–41.

11. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Korenevskiy N. Experience in the Development of Rehabilitation Exoskeletons. *Biomedical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 3.

12. Jatsun S.M., Jatsun A.S., Rukavitsyn A.N. Designing a Mechanotherapy Device for Rehabilitation of Lower Extremities of Humans. *Biomed Eng*, 2016, 50, pp. 128–133.

13. Jamwal P., Hussain S., Xie S. Restage design analysis and multicriteria optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 1433–1446.
14. Wang C., Fang Y., Guo S., Zhou C. Design and kinematic analysis of redundantly actuated parallel mechanisms for ankle rehabilitation. *Robotica*, 2015, vol.33, no. 2, pp. 366–384.
15. Zeng D., Wu H., Zhao X., Lu W., Xuelin Luo A New Type of Ankle-Foot Rehabilitation Robot Based on Muscle Motor Characteristics. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, vol. 8, pp. 189-195.
16. Antonellis P., Galle S., Clercq D. D., Malcolm P. Altering gait variability with an ankle exoskeleton, "PLoS One, 2018, vol. 13, no. 10, Art.no. e0205088.
17. Marian G. Alvarez-Perez, Mario A. Garcia-Murillo, J. Jesús Cervantes-Sánchez. Robot-assisted ankle rehabilitation: a review, disability and rehabilitation. *Assist Technol.* 2020;15(4):394–408.
18. Zhang L., Li J., Dong M. et al., Design and Workspace Analysis of a Parallel Ankle Rehabilitation Robot (PARR). *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2019, Article ID 4164790, 10 pages.
19. Jamwal PK, Xie S, Aw KC. Kinematic design optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified genetic algorithm. *Robot Autom Syst.* 2009; 57(10):1018–27.
20. Vallés Marina, Casalilla José, Valera Ángel, et al. A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation. *Robotica.* 2017; 35:1939–57.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Князев Андрей Александрович**, магистрант, кафедра «Мехатроника и робототехника», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ak290599@yandex.ru

**Andrei A. Knyazev**, Master Student, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ak290599@yandex.ru

**Федоров Андрей Владимирович**, аспирант, кафедра «Мехатроника и робототехника», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: newteormeh@inbox.ru

**Andrei V. Fedorov**, Post-Graduate Student, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: newteormeh@inbox.ru

**Яцун Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и робототехника», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

**Andrey S. Yatsun**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

## Оптимизация системы управления реализацией национальных проектов в регионе по критерию возврата к заданной целевой программе

Е.Э. Аверченкова <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Брянский государственный технический университет  
ул. Горького, д.36, г. Брянск 241050, Российская Федерация

✉ e-mail: lena\_ki@inbox.ru

### Резюме

**Цель исследования** – формализация критерия оптимизации в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона РФ, обеспечивающего основания для формирования управляющего воздействия на систему индикаторов социально-экономического развития региона в условиях реализации Национальных проектов РФ.

**Методы.** В исследовании были применены методы системного анализа, позволившие определить такой критерий оптимизации в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона РФ, как способность возвращения к исходной целевой программе реализации Национальных проектов в регионах РФ, определяемая реакцией на ошибку при завершении переходного процесса. Применение методов принятия решений базируется на учете временного фактора принятия управленческих решений в текущем периоде времени с учетом необходимости коррекции на ошибку по каждому целевому ориентиру показателя конкретного Национального проекта РФ в периоде времени, предшествующем текущему.

**Результаты.** Разработан критерий оптимизации, задающий способность системы управления реализацией Национальных проектов развития региона к возврату к заданной целевой программе реализации Национальных проектов в регионах РФ. Формализовано понятие предельно допустимой ошибки при анализе реакции системы управления реализацией Национальных проектов развития региона на коррекцию управляющего воздействия, предпринятого в предыдущий период. Выявление превалирования, или эксцесса ошибки, в динамике показателей Национальных проектов РФ позволит вовремя скорректировать управленческие решения с учетом временного фактора.

**Заключение.** Полученный критерий оптимизации в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона РФ позволит в дальнейшем определить задачу оптимизации – поиска управляющего воздействия на систему индикаторов социально-экономического развития региона при осуществлении Национальных проектов РФ.

**Ключевые слова:** управление; оптимизация; Национальные проекты; система управления; критерии.

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

**Для цитирования:** Аверченкова Е.Э. Оптимизация системы управления реализацией национальных проектов в регионе по критерию возврата к заданной целевой программе // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 88-102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-88-102>.

Поступила в редакцию 21.07.2022

Подписана в печать 06.09.2022

Опубликована 14.10.2022

# Optimization of the Management System for the Implementation of National Projects in the Region According to the Criterion of Returning to a Given Target Program

Elena E. Averchenkova <sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Bryansk State Technical University  
36, Gorkogo str., Bryansk 241050, Russian Federation

✉ e-mail: lena\_ki@inbox.ru

## Abstract

**Purpose of research.** The purpose of the study is to formalize one of the optimization criteria in the management system for the implementation of National development projects in the region of the Russian Federation.

**Methods.** The methods of system analysis and decision-making were used in the study, which made it possible to determine such an optimization criterion in the management system for the implementation of National development projects in the Russian Federation region as the ability to return to the original target program for the implementation of National projects in the regions of the Russian Federation, determined by the reaction to an error at the end of the transition process.

**Results.** An optimization criterion has been developed that determines the ability of the management system for the implementation of National development projects in the region to return to the specified target program for the implementation of National projects in the regions of the Russian Federation. Identification of the prevalence, or excess of error, in the dynamics of indicators of National projects of the Russian Federation will allow for timely adjustment of management decisions taking into account the time factor.

**Conclusion.** The obtained optimization criterion in the management system for the implementation of National development projects of the Russian Federation region will further determine the optimization task - the search for a controlling influence on the system of indicators of socio-economic development of the region in the context of the implementation of National projects of the Russian Federation.

**Keywords:** optimization criterion; management of the implementation of National projects of the Russian Federation.

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

**For citation:** Averchenkova E. E. Optimization of the Management System for the Implementation of National Projects in the Region According to the Criterion of Returning to a Given Target Program. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 88-102 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-88-102>.

Received 21.07.2022

Accepted 06.09.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

## Введение

Сегодня субъекты (регионы) РФ рассматриваются как объекты государственного регулирования и управления в контексте реализации Национальных

проектов РФ [1, 2]. Развитие теоретических основ формирования научно-обоснованных решений при управлении реализацией Национальных проектов в регионах РФ определяется существенным потенциалом применения в этих

целях теории системного анализа [3, 4] и принятия решений [5, 6]. На текущий момент мониторинг целевых показателей в рамках региональных паспортов Национальных проектов проводится ежемесячно, а рассмотрение итогов мониторинга осуществляется не реже, чем ежеквартально<sup>1</sup>, что не всегда позволяет вовремя отследить негативную динамику достижения показателей Национальных проектов РФ. Следовательно, управление реализацией Национальных проектов в регионах РФ должно быть обеспечено корректными механизмами контроля в рамках системы управления реализацией Национальных проектов в регионах РФ, которая учитывала бы специфику Национальных проектов РФ применительно к конкретному региону. Таким образом, возникает необходимость формализации критериев оптимизации управления применительно к области поддержки принятия решений в части управления реализацией Национальных проектов в регионах РФ.

В данной работе ставится цель формализовать один из критериев оптимизации в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона РФ, что позволяет в дальнейшем определить задачу оптимизации - поиска управляющего воздействия

на систему индикаторов социально-экономического развития региона в условиях реализации Национальных проектов РФ. Важнейшим условием решения поставленной задачи оптимизации является минимизация временного фактора принятия управленческих решений в анализируемом временном интервале при осуществлении коррекционных воздействий на предельно допустимую ошибку, которая рассчитывается для каждого целевого показателя конкретного Национального проекта РФ.

В основе решаемых в работе задач были использованы методологические подходы поддержки принятия решений при управлении реализацией Национальных проектов в регионах РФ [7], а также результаты моделирования ряда показателей социально-экономического развития региона [8]. Методическим инструментарием, используемым для формализации критерия оптимизации в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона РФ, является теория систем и принятия решений.

## Материалы и методы

Одним из критериев оптимизации в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона, введенных ранее в работе<sup>2</sup>, была определена способность возвращения к ис-

---

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ (31.10.2018 N 1288 (в редакции 28.06.2022)) "Об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации". URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_310151/7d621220c2a686df7b51ded0e31e345ff3d4ad6a/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_310151/7d621220c2a686df7b51ded0e31e345ff3d4ad6a/).

---

<sup>2</sup> Методология управления региональной социально-экономической системой на основе анализа влияния внешней среды: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.10 / Аверченкова Елена Эдуардовна. Брянск, 2020. 379 с.

ходной целевой программе реализации Национальных проектов в регионах РФ, определяемая реакцией на ошибку  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}) \rightarrow \min$  при завершении переходного процесса:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}) = \varepsilon_{\beta\gamma}^y(t_{пп}) + \delta_{\beta\gamma}(t_{пп}); \\ t_{пп}^z \in [t_0^z; t_k^z], \end{cases} \quad (1)$$

где  $\delta_{\beta\gamma}(t_{пп})$  – элементы, определяющие матрицу  $\Delta$ , и представляющие собой разность между фактическими значениями ( $y_{\beta\gamma}^{\text{факт}}(t_{пп})$ ) и плановыми ( $y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп})$ ) величинами, рассчитанными на конец переходного периода  $t_{пп}$ ; потребуем, чтобы  $\delta_{\beta\gamma}(t_{пп}) = |y_{\beta\gamma}^{\text{факт}}(t_{пп}) - y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп})|$ ;

$\varepsilon_{\beta\gamma}^y(t_{пп})$  – элементы, определяющие матрицу  $\varepsilon$ , определим, что  $\varepsilon_{\beta\gamma}^y(t_{пп}) = g(t) - y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп})$ , где  $g(t)$  – значения матрицы  $G$ , представляющей собой целевые показатели конкретного Национального проекта. Потребуем, чтобы при  $t_{пп}=1$  мес выполнялось выражение  $\varepsilon_{\beta\gamma}^y(t_{пп}=1 \text{ мес}) = 0,05g_{\beta\gamma}(t_k)$ ; при  $t_{пп}=3$  мес -  $\varepsilon_{\beta\gamma}^y(t_{пп}=3 \text{ мес}) = 0,05g_{\beta\gamma}(t_k)$ , а при  $t_{пп}=12$  мес -  $\varepsilon_{\beta\gamma}^y(t_{пп}=12 \text{ мес}) = 0,02g_{\beta\gamma}(t_k)$ .

Такое представление предельно допустимой ошибки  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп})$  связано с представлением о том, что при  $t_{пп}=4t_y$  считается, что переходный процесс завершен (это определяет 98% установившихся значений анализируемых показателей [9, 10]).

Приняв календарный год за анализируемый период, примем, что  $t_{пп}=12$  месяцев, следовательно, получаем время

установления  $t_y=3$  мес. и, соответственно,  $y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп}) = 0,98g_{\beta\gamma}(t_k)$ . Календарный год удобнее делить на 4 квартала, однако каждый квартал, а затем и месяц – на три части. Таким образом, определим, что  $t_{пп}=3t_y$ , где  $t_{пп} \in \{1 \text{ мес.}, 3 \text{ мес.}\}$ , а  $t_y \in \{10 \text{ дней}, 1 \text{ мес.}\}$ , тогда  $y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп}) = 0,95g_{\beta\gamma}(t_k)$ .

Введем понятие матрицы предельно допустимой ошибки  $\varepsilon(t_{пп}^{z-1}) = \|\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1})\|_{\beta=1, \gamma=1}^{13 \times 31}$ . Ее назначение – определить наличие и величину предельно допустимой ошибки при анализе реакции системы управления реализацией Национальных проектов развития региона на коррекцию управляющего воздействия, предпринятого в предыдущий период  $t_{пп}^{z-1} \in [t_0^{z-1}; t_k^{z-1}]$ . Отметим, что исправление ошибки происходит в периоде  $t^z$ . Определим, что:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1}) \in \{0; \delta_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1})\} \text{ при } t_{пп}^{z-1} \in [t_0^{z-1}; t_k^{z-1}]; \\ \chi_{\beta\gamma} \in \{-1; 1\}. \end{cases} \quad (2)$$

Это означает, что предельно допустимая ошибка  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1})$  предыдущего периода рассматривается двойко.

В первом случае при  $\chi_{\beta\gamma}=1$  принимается положительная интерпретация динамики  $\gamma$ -ного целевого показателя для  $\beta$ -ого Национального проекта РФ.

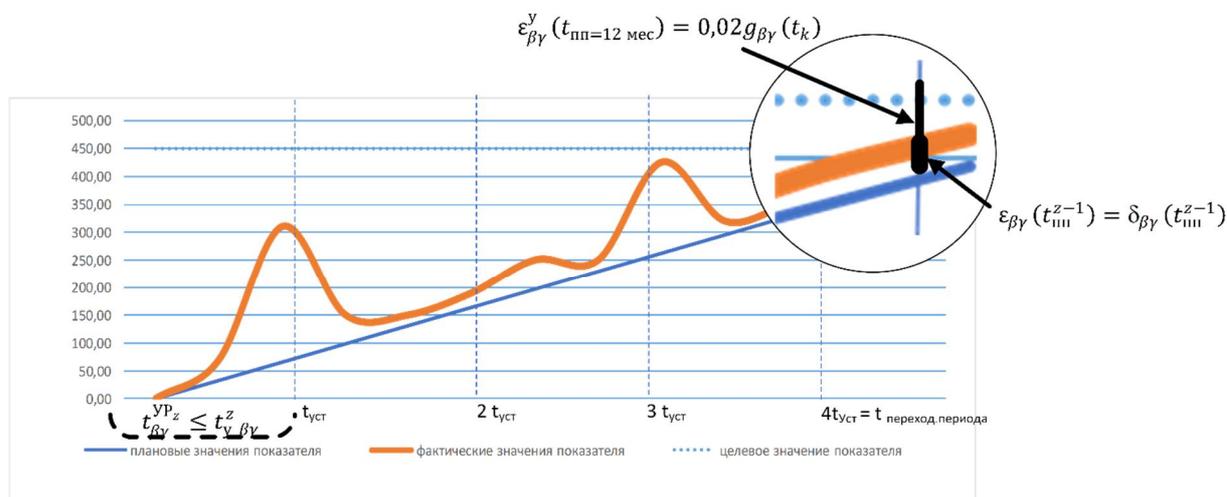
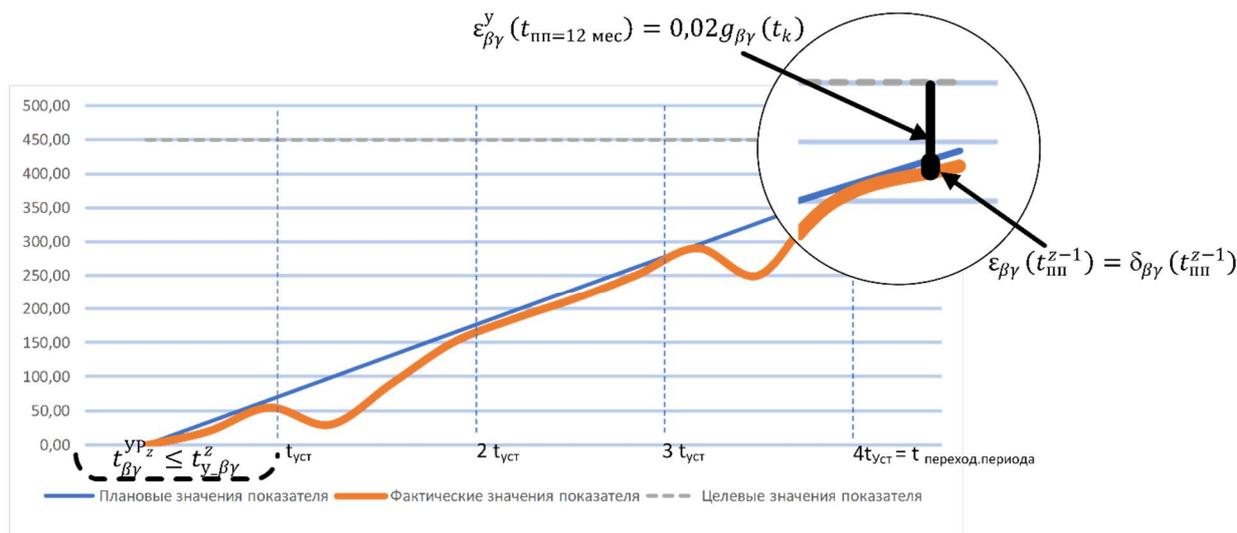
$$\begin{cases} y_{\beta\gamma}^{\text{факт}}(t_{пп}^{z-1}) \geq y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп}^{z-1}), \\ \varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1}) = 0 \quad (\text{случай 1.1}); \\ y_{\beta\gamma}^{\text{факт}}(t_{пп}^{z-1}) < y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{пп}^{z-1}), \\ \varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1}) = \delta_{\beta\gamma}(t_{пп}^{z-1}) \quad (\text{случай 1.2}). \end{cases} \quad (3)$$

Во втором случае при  $\chi_{\beta\gamma} = -1$  принимается негативная интерпретация ди-

намики  $\gamma$ -ного целевого показателя для  $\beta$ -ого Национального проекта РФ.:

$$\begin{cases} y_{\beta\gamma}^{\text{факт}}(t_{\text{пп}}^{z-1}) < y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{\text{пп}}^{z-1}), \\ \text{то } \varepsilon_{\beta\gamma}(t_{\text{пп}}^{z-1}) = 0 \quad (\text{случай 2.1}); \\ y_{\beta\gamma}^{\text{факт}}(t_{\text{пп}}^{z-1}) \geq y_{\beta\gamma}^{\text{план}}(t_{\text{пп}}^{z-1}), \\ \text{то } \varepsilon_{\beta\gamma}(t_{\text{пп}}^{z-1}) = \delta_{\beta\gamma}(t_{\text{пп}}^{z-1}). \end{cases} \quad (4)$$

Представление рассмотренных случаев для показателя «Смертность в трудоспособном возрасте на 100 тыс. чел.» в рамках исполнения целевых ориентиров Национального проекта «Здравоохранение» [11] приведено на рис.1.

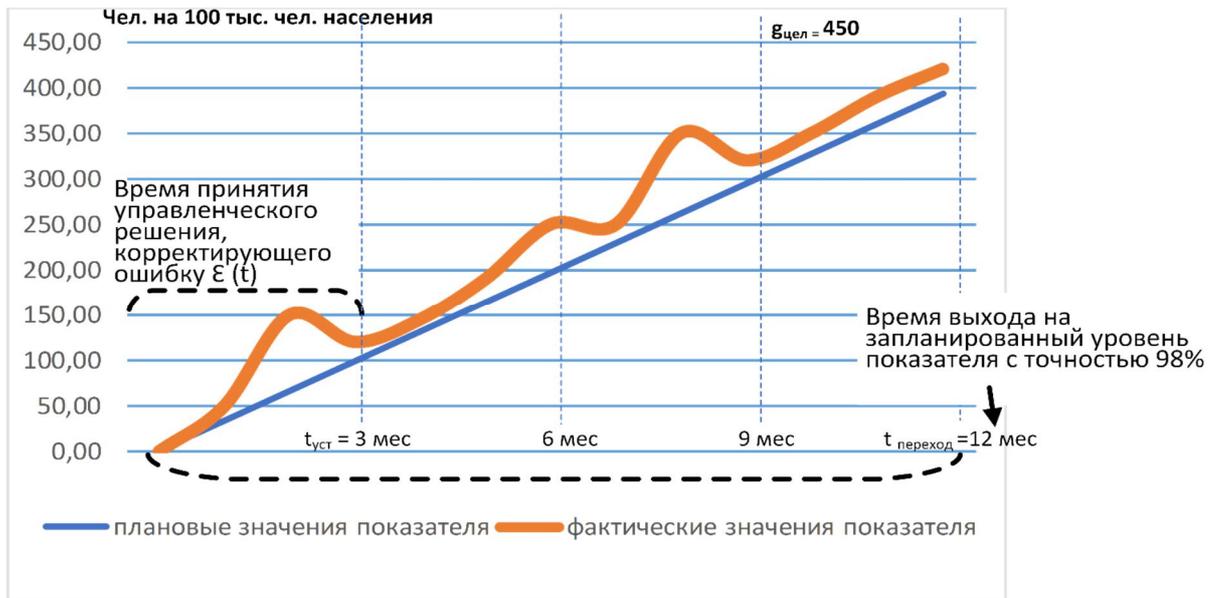


**Рис. 1.** Формирование предельно допустимой ошибки  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{\text{пп}}^{z-1})$  для показателя «Смертность в трудоспособном возрасте на 100 тыс. чел.» в рамках исполнения целевых ориентиров Национального проекта «Здравоохранение»

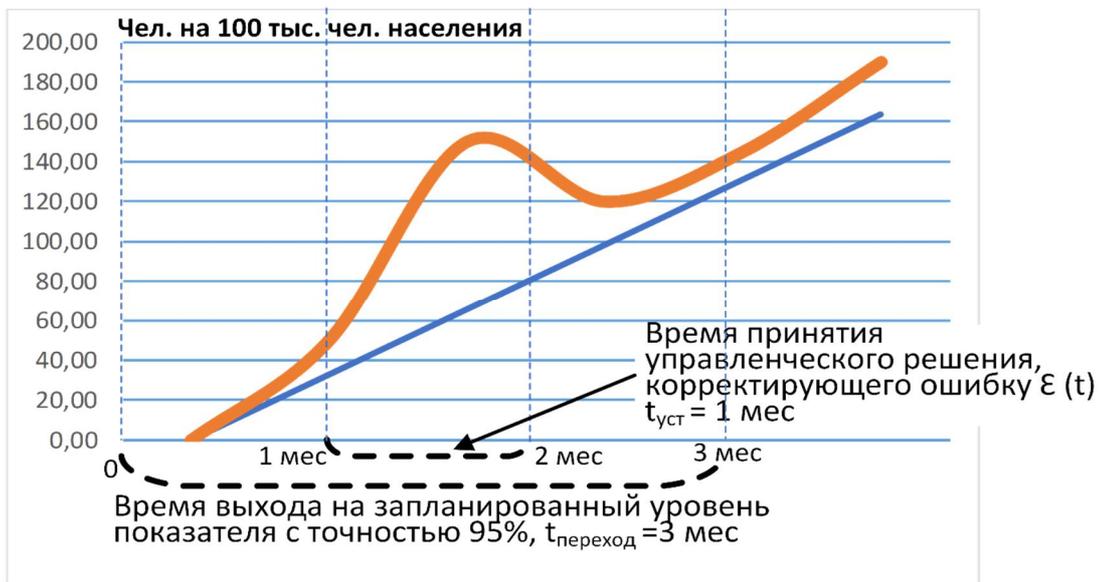
**Fig. 1.** Formation of the maximum permissible error  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{\text{пп}}^{z-1})$  for the indicator "Mortality in working age per 100 thousand people" within the framework of the implementation of the targets of the National Project "Healthcare"

Востребованность внесения изменений в управленческие мероприятия назначается с учетом различной периодичности анализируемого периода. Это может быть поквартальная (рис. 2а) или

ежемесячная (рис. 2б) корректировка управленческих мероприятий, или в целом по итогам года. Тогда оцениваемый период определяется декадой (10 дней) или месяцем.



а) Временной фактор принятия управленческого решения при  $t_{пп\_βγ}^z = 4t_{у\_βγ}^z$  при  $t_{пп\_βγ}^z = 12$  мес



б) Временной фактор принятия управленческого решения при  $t_{пп\_βγ}^z = 3t_{у\_βγ}^z$  при  $t_{пп\_βγ}^z = 3$  мес

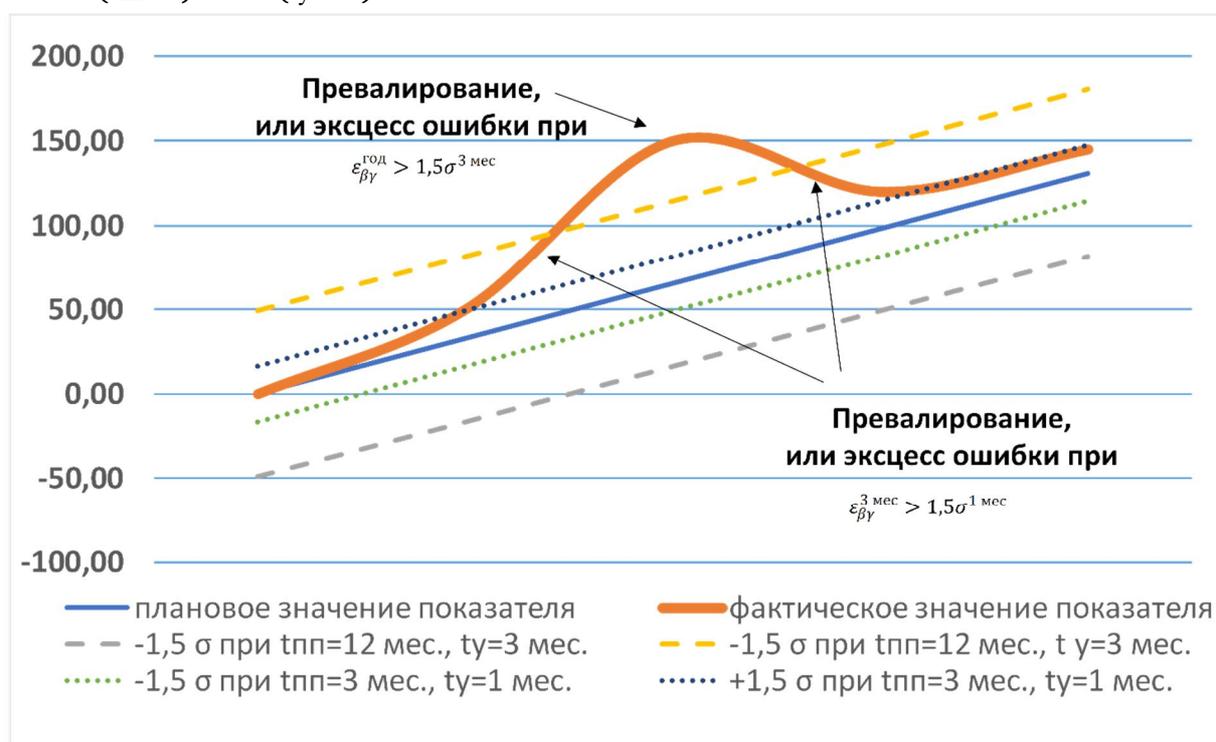
Рис. 2. Принятие управленческого решения при  $t_{пп}=12$  мес. (а) и  $t_{пп}=3$  мес. (б)

Fig. 2. Management decision-making at  $t_{pp}=12$  months (a) and  $t_{pp}=3$  months (б)

Введем понятие превалирования, или эксцесса ошибки как превышение предельно допустимой ошибкой полуторного значения стандартного отклонения:  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп}) \leq 1,5\sigma_{\beta\gamma}(t_y)$ . С учетом ранее введенных временных интервалов  $t_{пп} \in \{1 \text{ мес.}, 3 \text{ мес.}\}$ , определим превалирование, или эксцесса ошибки следующим выражением:

$$\begin{cases} \varepsilon(t_{пп}^{12 \text{ мес.}}) \leq 1,5\sigma(t_y^{3 \text{ мес.}}); \\ \varepsilon(t_{пп}^{3 \text{ мес.}}) \leq 1,5\sigma(t_y^{1 \text{ мес.}}). \end{cases} \quad (5)$$

С вероятностью  $p=86,6\%$  значение предельно допустимой ошибки  $\varepsilon_{\beta\gamma}(t_{пп})$  превышает нулевое значение меньше, чем на полутора стандартных отклонения  $\sigma$ . Следовательно, ошибка может появиться с вероятностью  $p=13,3\%$  с учетом нормальности ее распределения. Интерпретация понятия превалирования (эксцесса ошибки) приведено на рис. 3.



**Рис. 3.** Визуальная интерпретация превалирования (эксцесса ошибки) для показателя Национального проекта «Здравоохранение» - «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» в 2020 г. при  $t_y=1 \text{ мес.}, t_{пп}=3 \text{ мес.}$

**Fig. 3.** Visual interpretation of the prevalence (excess of error) for the indicator of the National Health Project - "Reduction of mortality of the working-age population (per 100 thousand population)" in 2020 at  $t_y=1 \text{ month}, t_{пп}=3 \text{ months}$

С позиций необходимости назначения корректирующих управленческих мероприятий можно определить, что доверительный интервал, определяемый как  $[-1,5\sigma_{\beta\gamma}; +1,5\sigma_{\beta\gamma}]$ , обеспечит появ-

ление в одном семи/восьми управленческих ситуациях необходимость изменения управленческого воздействия в системе управления реализацией Национальных проектов развития региона.

## Результаты и их обсуждение

Основываясь на введенном выше понятии способности системы управления реализацией Национальных проектов развития региона к возвращению к исходной целевой программе реализации Национальных проектов в регионах РФ, покажем на конкретных примерах востребованность в коррекционных управленческих воздействиях. Набор доступных данных по Брянской области с Портала открытых данных РФ [12] позволяет изучить такой показатель, как

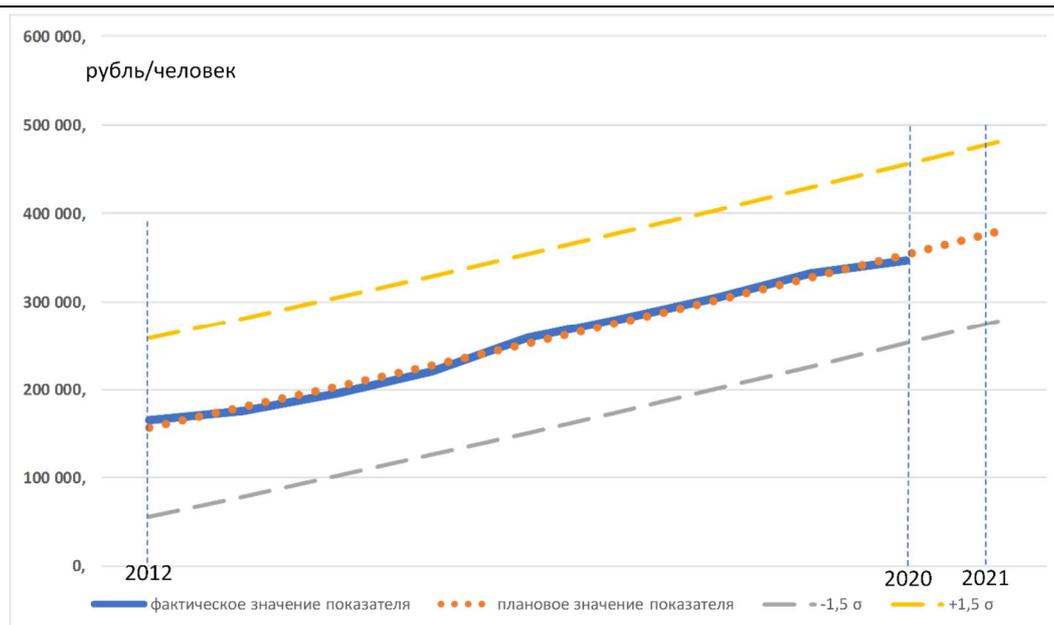
«Валовый региональный продукт на душу населения по Брянской области» за 2012-2020 гг. и его прогнозируемое значение на 2021 г. (табл. 1). Значение стандартного отклонения  $\sigma = 67672$  руб/чел. Было предложено использовать квадратичную функцию для аппроксимации анализируемого показателя:  $y = 198x^2 + 22622x + 134105$ ,  $R^2 = 0,999$ .

Таким образом, с вероятностью 95% полученные модели являются адекватными. На рис. 4 представлена визуальная интерпретация трендов показателя за 2012-2021 гг.

**Таблица 1.** Валовый региональный продукт на душу населения по Брянской области (рубль, значение показателя за год) за 1996-2021 гг.[12]

**Table 1.** Gross regional product per capita in the Bryansk region (ruble, the value of the indicator for the year) for 1996-2021 [12]

Период / Period	Значения показателя / Indicator values		Доверительный интервал / Confidence interval	
	Фактические / Actual	В соответствии с регрессионной моделью / According to the regression model	-1,5 $\sigma$	+1,5 $\sigma$
2012	164727	156925	55417	258433
2013	175865	180141	78633	281649
2014	196097	203753	102245	305261
2015	221080	227761	126253	329269
2016	258753	252165	150657	353673
2017	280630	276965	175457	378473
2018	304547	302161	200653	403669
2019	332443	327753	226245	429261
2020	347205	353741	252233	455249
Прогноз на 2021 г.	-	380125	278617	481633



**Рис. 4.** Валовой региональный продукт на душу населения (рубль, значение показателя за год) за 2012-2021 гг.

**Fig. 4.** Gross regional product per capita (ruble, the value of the indicator for the year) for 2012-2021

Таким образом, прогнозное значение показателя «Валовой региональный продукт на душу населения» на 2021 г. находится в пределах сформированного доверительного интервала при расчете стандартного отклонения за период 2012-2020 гг., следовательно, по показатель попадает в «зеленую зону», а принятия управленческих решений не требуется.

Далее покажем, как реализуется критерий быстрого действия системы управления реализацией Национальных

проектов развития региона при возникновении преваляирования, или эксцесса ошибки. Для демонстрации предложим такой показатель Национального проекта «Здравоохранение», как «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» (табл. 2), целевые значения которого были взяты из соответствующего паспорта [13], а фактические – из Российского статистического ежегодника за 2021 год [14].

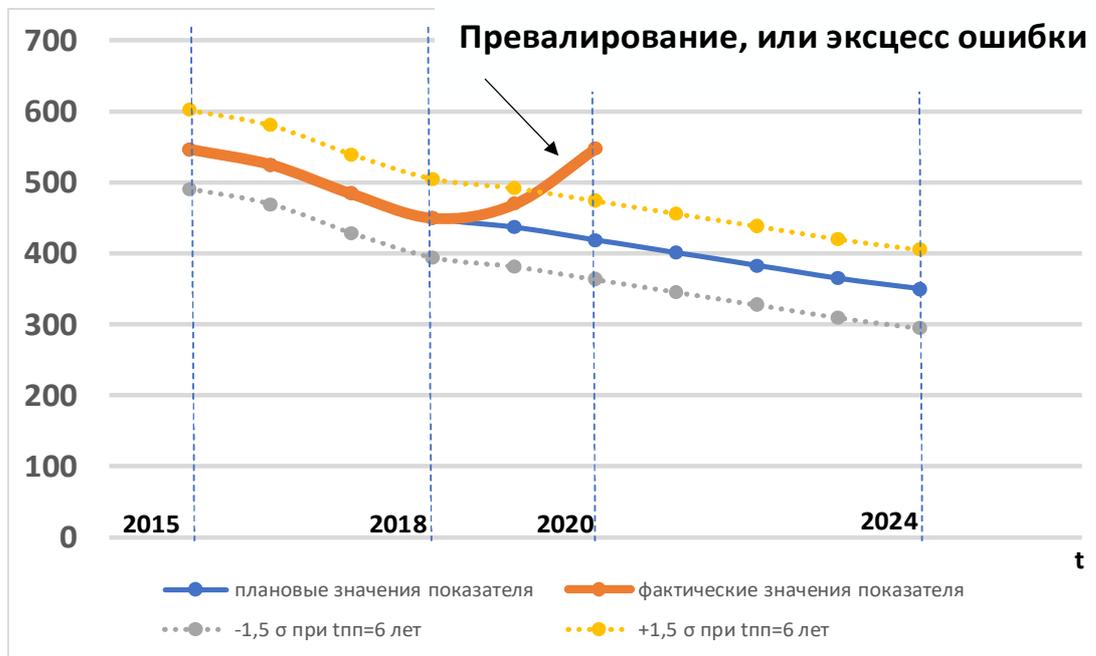
**Таблица 2.** Значения показателя «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» в периоде 2019-2024 гг.

**Table 2.** Values of the indicator "Reduction of mortality of the working-age population (per 100 thousand population)" in the period 2019-2024

Анализируемый период / Analyzed period	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Целевые значения, чел. / Target values, p.	-	-	-	-	437,0	419,0	401,0	383,0	365,0	350,0
Фактические значения, чел. / Actual values, p.	546,7	525,3	484,5	450,0	470,0	548,2	-	-	-	-

На рис. 5 представлена динамика фактических значений анализируемого показателя за 6 лет (2015-2024 гг.), а также показано превазирование, или

эксцесс ошибки, которое отмечается в течение 2019-2020 гг. Доверительный интервал показателя  $[-1,5\sigma; +1,5\sigma]$  был рассчитан для  $t_{\text{пп}}=6$  лет.



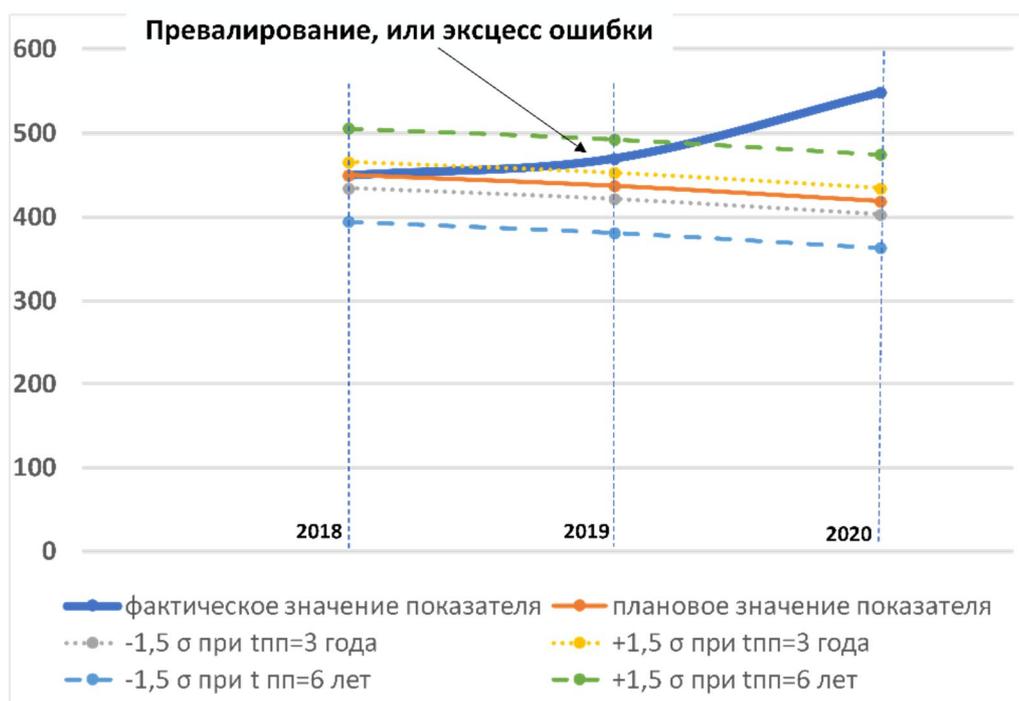
**Рис. 5.** Формирование превазирования (эксцесса ошибки) для анализируемого показателя Национального проекта «Здравоохранение» - «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» в периоде 2019-2024 гг.

**Fig. 5.** The formation of the prevalence (excess of error) for the analyzed indicator of the National project "Healthcare" - "Reduction of mortality of the working-age population (per 100 thousand population)" in the period 2019-2024.

Аналогичным образом можно рассмотреть более короткий, двухлетний временной интервал за 2019-2020 гг. (рис. 6). Тренд фактических значений показателя рассматривался в пределах доверительного интервала показателя  $[-1,5\sigma; +1,5\sigma]$ , рассчитанного для  $t_{\text{пп}}=6$  лет и для  $t_{\text{пп}}=3$  года. На рис. 6 показано, что факт наличия превазирования (эксцесса ошибки) присутствует только в 2019 году.

Действительно, согласно докладу Счетной палаты в 2021 г. [15], влияние пандемии COVID-19 при одновремен-

ном ухудшении эпидемиологической ситуации и снижении доступности плановой медицинской помощи привело к тому, что часть показателей Национального проекта «Здравоохранение» не может быть достигнута в заявленные сроки. В том числе, это касается и такого показателя, как «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)». Проанализируем его годовые значения (рис. 7), что позволит понять, в какой конкретный момент времени произошло формирование превазирования, или эксцесса ошибки.



**Рис. 6.** Формирование превалирования (эксцесса ошибки) показателя Национального проекта «Здравоохранение» - «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» в периоде 2019-2020 гг.

**Fig. 6.** Formation of the prevalence (excess of error) of the indicator of the National project "Healthcare" - "Reduction of mortality of the working-age population (per 100 thousand population)" in the period 2019-2020

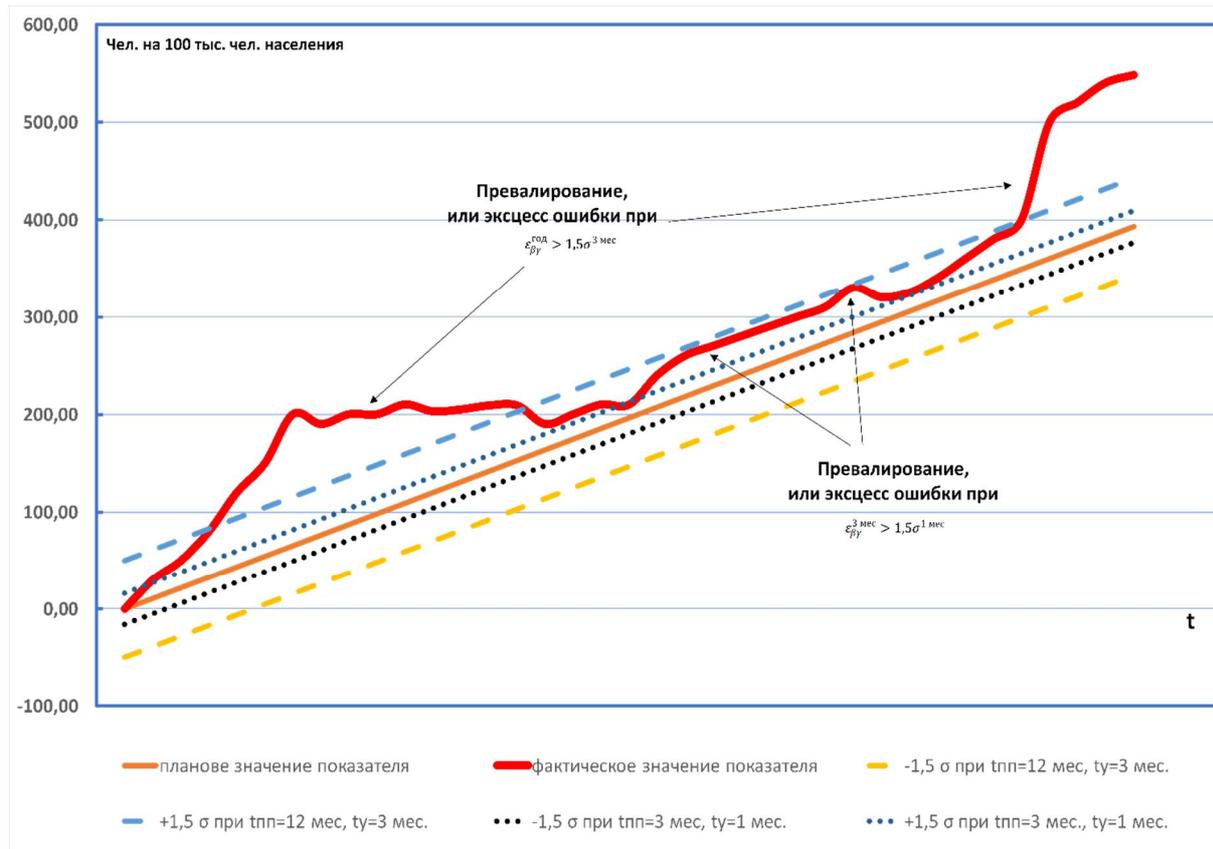
Распространение новой коронавирусной инфекции [16] объективно привело к смещению от целевого тренда анализируемого показателя, установленного на момент начала реализации Национальных проектов в 2018 году.

В первой трети 2020 г. и в конце 2020 г. отмечаются существенные «скачки» значений показателя, которые интерпретируются как превалирование, или эксцесс ошибки. Необходимо отметить, что целевые установки Национальных проектов в связи с объективными эпидемиологическими обстоятельствами были частично скорректированы: был принят Указ Президента РФ от 21.06.2020 г. (№ 474 «О нацио-

нальных целях развития РФ на период до 2030 года»)<sup>1</sup>, определяющий Единый План по достижению национальных целей развития РФ.

Сроки реализации Единого Плана определены вплоть до 2030 года [17]. В новой трактовке показатель «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» звучит как «Снижение смертности населения трудоспособного возраста не менее чем на 35 процентов», сроки его достижения установлены до 2024 года включительно.

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74304210/>



**Рис. 7.** Формирование превазирования (эксцесса ошибки) показателя Национального проекта «Здравоохранение» - «Снижение смертности населения трудоспособного возраста (на 100 тыс. населения)» в 2020 г.

**Fig. 7.** Formation of the prevalence (excess of error) of the indicator of the National project "Healthcare" - "Reduction of mortality of the working-age population (per 100 thousand population)" in 2020

## Выводы

В статье представлен критерий оптимизации, задающий способность к возвращению системы управления реализацией Национальных проектов развития региона к ранее определенным ориентирам. Формируемая ошибка  $\varepsilon(t_{\text{пп}}^{z-1})$  определяется понятием превазирования, причиной которой выступают как динамические тренды внешнего окружения региона, так и предпринятые управленческие мероприятия, реализованные в предыдущих времен-

ных интервалах. Внесение изменений в управленческие мероприятия для исправления ошибки осуществляется уже в текущем периоде.

Итерации с периодичностью один раз в декаду, один раз в месяц или раз в три месяца позволят эффективнее реагировать на появление превазирования, или эксцесса ошибки. Это дает возможность изменить управляющее воздействие и достичь заявленного целевого результата в рамках реализации Национальных проектов в регионах РФ.

### Список литературы

1. Лексин В.Н. Стратегия пространственного развития России: разработка и начало реализации // Россия: тенденции и перспективы развития: ежегодник / Институт научной информации по общественным наукам РАН, Отдел научного сотрудничества; отв. ред. В.И. Герасимов. М., 2019. С. 84-94.
2. Швец И.Ю., Швец Ю.Ю. Управление пространственным развитием региона. 1-е изд. М.: ООО "ОнтоПринт", 2016. 402 с.
3. Лексин В.Н. Неопределенность, риски и устойчивость систем // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2022. Т. 72. № 1. С. 3-14.
4. Дерябин Н.И. Системный анализ как инструмент государственного стратегического управления в России // Россия: тенденции и перспективы развития. М., 2018. С. 36-42.
5. Жигарь О. В. О проблемах оценки качества и эффективности решений в органах государственного управления // Общество, экономика, управление. 2019. Т. 3, № 2. С. 16–22.
6. Козырев М. С. Принятие и исполнение государственных решений: методологические и процессуально-правовые аспекты. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2016. 590 с.
7. Аверченкова Е.Э., Аверченков А.В. Научные основы управления реализацией национальных проектов в регионах РФ. Брянск: ИП Усова И.Н., 2022. 151 с.
8. Использование многофакторного корреляционно-регрессионного анализа для моделирования региональной социально-экономической системы в информационной советующей системе / А.В. Аверченков, Е.Э. Аверченкова, Д.И. Гончаров, К.Ю. Помогаева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 1 (76). С. 101-111.
9. Давыдов А.В. Основы теории управления. Екатеринбург: УГГУ, 2008. 128с.
10. Желтиков О.М. Основы теории управления. URL: <http://www.jelomak.ru/pager.htm>.
11. Паспорт Национального проекта «Здравоохранение». URL: <http://government.ru/info/35561/>.
12. Портал открытых данных РФ: экономические показатели. URL: <https://data.gov.ru/taxonomy/term/9/datasets>.
13. Национальный проект «Здравоохранение»: инфографика. URL: <http://static.government.ru/media/files/TVIdAva2IHGtqxvRQAQlzABZ2dAna23R.pdf>.
14. Демография: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781>.
15. Оперативный доклад Счетной палаты за 2021 год. URL: <https://ach.gov.ru/audit/oper-2021>.
16. Мильчаков М. В. Реализация национальных проектов в регионах в условиях противодействия коронавирусной инфекции // Финансовый журнал. 2020. Т.18. № 3. С. 28–47. DOI: 10.31107/2075-1990-2020-3-28-47

17. Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации на период до 2024 года и на плановый период до 2030 года. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/file/ffccd6ed40dbd803eedd11bc8c9f7571/Plan\\_po\\_do\\_stizheniyu\\_nacionalnyh\\_celey\\_razvitiya\\_do\\_2024g.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/ffccd6ed40dbd803eedd11bc8c9f7571/Plan_po_do_stizheniyu_nacionalnyh_celey_razvitiya_do_2024g.pdf).

## References

1. Leksin V.N. [Spatial development strategy of Russia: development and start of implementation]. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya. Ezhegodnik* [Russia: trends and prospects of development. Yearbook]; ed. by V.I. Gerasimov. Moscow, 2019, pp. 84-94 (In Russ.).

2. Shvets I.Yu., Shvets Yu.Yu. *Upravlenie prostranstvennym razvitiem regiona* [Management of spatial development of the region]. Moscow, 2016, 402 p.

3. Leksin V.N. Neopredelennost', riski i ustoichivost' sistem [Uncertainty, risks and stability of systems]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*, 2022, vol. 72, no. 1, pp. 3-14.

4. Deryabin N.I. [System analysis as a tool of state strategic management in Russia]. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya* [Russia: trends and prospects of development]. Moscow, 2018, pp. 36-42 (In Russ.).

5. Zhigar O. V. O problemakh otsenki kachestva i effektivnosti reshenii v organakh gosudarstvennogo upravleniya [On the problems of assessing the quality and effectiveness of decisions in public administration]. *Obshchestvo, ekonomika, upravlenie = Society, Economics, Management*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 16-22.

6. Kozyrev M. S. *Prinyatie i ispolnenie gosudarstvennykh reshenii: metodologicheskie i protsessual'no-pravovye aspekty* [Adoption and execution of state decisions: methodological and procedural-legal aspects]. Moscow; Berlin, Direct-Media Publ., 2016, 590 p.

7. Averchenkova E.E., Averchenkov A.V. *Nauchnye osnovy upravleniya realizatsiei natsional'nykh projektov v regionakh RF* [Scientific foundations of managing the implementation of national projects in the regions of the Russian Federation]. Bryansk, 2022, 151 p.

8. Averchenkov A.V., Averchenkova E.E., Goncharov D.I., Pomogaeva K.Yu. *Ispol'zovanie mnogofaktornogo korrelyatsionno-regressionnogo analiza dlya modelirovaniya regional'noi sotsial'no-ekonomicheskoi sistemy v informatsionnoi sovetuyushchei sisteme* [The use of multivariate correlation and regression analysis for modeling the regional socio-economic system in the information advisory system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 1 (76), pp. 101-111.

9. Davydov A.V. *Osnovy teorii upravleniya* [Fundamentals of management theory]. Yekaterinburg, UGSU Publ., 2008, 128 p.

10. Zheltikov O.M. *Osnovy teorii upravleniya* [Fundamentals of management theory]. Available at: <http://www.jelomak.ru/pager.htm>.

11. *Pasport Natsional'nogo proekta «Zdravookhranenie»* [Passport of the National project "Healthcare"]. Available at: <http://government.ru/info/35561/>.

12. *Portal otkrytykh dannykh RF: ekonomicheskie pokazateli* [Open Data portal of the Russian Federation: economic indicators]. Available at: <https://data.gov.ru/taxonomy/term/9/datasets>.

13. *Natsional'nyi proekt «Zdravookhranenie»: infografika* [National project "Healthcare": infographics]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/TVIdAva2IHGtqxvRQAQlzABZ2dAna23R.pdf>.

14. *Demografiya: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki* [Demography: Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781>.

15. *Operativnyi doklad Schetnoi palaty za 2021 god* [Operational report of the Accounting Chamber for 2021]. Available at: <https://ach.gov.ru/audit/oper-2021>.

16. Milchakov M. V. Realizatsiya natsional'nykh proektov v regionakh v usloviyakh protivodeistviya koronavirusnoi infektsii [Implementation of national projects in the regions in the context of countering coronavirus infection]. *Finansovyi zhurnal = Financial Journal*, 2020, vol.18, no. 3, pp. 28-47. DOI: 10.31107/2075-1990-2020-3-28-47

17. *Edinyi plan po dostizheniyu natsional'nykh tselei razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2024 goda i na planovyi period do 2030 goda* [A unified plan for achieving the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2024 and for the planning period up to 2030]. Available at: [https://www.economy.gov.ru/material/file/ffccd6ed40dbd803eedd11bc8c9f7571/Plan\\_po\\_dostizheniyu\\_natsionalnyh\\_tseley\\_razvitiya\\_do\\_2024g.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/ffccd6ed40dbd803eedd11bc8c9f7571/Plan_po_dostizheniyu_natsionalnyh_tseley_razvitiya_do_2024g.pdf).

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Аверченкова Елена Эдуардовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Цифровая экономика», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: [lana\\_ki@inbox.ru](mailto:lana_ki@inbox.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

**Elena E. Averchenkova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Digital Economy Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: [lana\\_ki@inbox.ru](mailto:lana_ki@inbox.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>

## Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора

С. Г. Емельянов <sup>1</sup>, М. В. Бобырь <sup>1</sup> ✉, Б. А. Бондаренко <sup>1</sup>

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

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Представленное в данной статье исследование нацелено на повышение точности определения оттенка цвета. В качестве предмета исследования использовалась разработанная нечетко-логическая система распознавания цветов. Показателем эффективности выступал результат расчета процента площади чувствительности и RMSE разработанного метода.

**Методы.** Разработан и реализован метод распознавания цветовой метки на основе нечеткой логики, а именно с помощью нечеткого вывода Мамдани, состоящего из следующих этапов: фаззификация, нечеткий логический вывод, дефаззификация. В процессе фаззификации использовались треугольные функции принадлежности. В качестве композиционного правила использовались 12 входных переменных, объединенных на основе композиционного правила Заде в 27. На этапе дефаззификации использовался метод отношения площадей. Объектом исследования выступала разработанная математическая модель модифицированного метода отношения площадей и метода центра тяжести для определения цвета.

**Результаты.** Разработана математическая модель, состоящая из 4 шагов, которая гарантирует четкое определение 9 цветов и их оттенков. На основе оценки корня среднеквадратической ошибки сделан вывод, что предложенная модель лучше традиционных вариантов. Выражается тем, что разработанный метод реагирует на промежутке всей поверхности выходных переменных, в то время как традиционные методы имеют зоны нечувствительности к изменению входных переменных.

**Заключение.** Была разработана нечетко-логическая система распознавания цвета. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что показатели RMSE и чувствительности имеют лучшие результаты по отношению к другим системам.

**Ключевые слова:** нечеткая-логическая система; распознавание цвета; дефаззификатор; rgb; оттенок.

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

**Для цитирования:** Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А. Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 103-116. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.

Поступила в редакцию 05.09.2022

Подписана в печать 16.09.2022

Опубликована 14.10.2022

© Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А., 2022

## Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier

Sergei G. Emelianov<sup>1</sup>, Maxim V. Bobyr<sup>1</sup> ✉, Bogdan A. Bondarenko<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The research presented in this article is aimed at improving the accuracy of determining the color shade. The developed fuzzy-logical color recognition system was used as the subject of the study. The efficiency indicator was the result of calculating the sensitivity area percentage and RMSE of the developed method.

**Methods.** A method based on fuzzy logic has been developed and implemented, namely, on the structure of Mamdani's fuzzy inference, which consists of the following stages: fuzzification, fuzzy logical inference, defuzzification. Triangular membership functions were used at the fuzzification stage. As a compositional rule, 12 input variables were used, combined on the basis of Zadeh's compositional rule in 27. At the defuzzification stage, the area ratio method was used. The object of the study was the developed mathematical model for determining color.

**Results.** A mathematical model has been developed, consisting of 4 steps, which guarantees a clear definition of 9 colors and their shades. Based on the estimation of the root of the mean square error, it was concluded that the proposed model is better than traditional options. It is expressed by the fact that the developed method reacts on the interval of the entire surface of output variables, while traditional methods have dead zones to changes in input variables.

**Conclusion.** A fuzzy-logical color recognition system was developed. In the course of experimental studies, it was found that the RMSE and sensitivity indicators have better results in relation to other systems.

**Keywords:** fuzzy-logic system; color recognition; defuzzifier; rgb; hue.

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

**For citation.** Emelianov S. G., Bobyr M. V., Bondarenko B. A. Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 103-116 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.

Received 05.09.2022

Accepted 16.09.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

### Введение

Нечеткие механизмы вывода применяются в ситуациях, когда невозможно принять решение в рамках классической логики. Такие системы просты и понятны. Они способны обеспечить наиболее эффективное решение сложных вопросов, легко модифицируемы, решают задачи с инженерными неопределенностями.

В работе [1] рассматривается алгоритм распознавания цветowych маркеров, блок-схема и псевдокод алгоритма. Предложен вариант системы распознавания цветowych маркеров на основе цифровой камеры. Проведено экспериментальное исследование системы на разных цифровых фильтрах. Представленные экспериментальные результаты [2-6] показывают, что алгоритм распо-

знавания цветowych маркеров позволяет с точностью до 95% распознавать маркеры при использовании гауссовского фильтра.

В статье [7] решение поставленной задачи достигается введением системы технического зрения, позволяющей на основе метода нечеткой кластеризации определять в режиме реального времени координаты центра цветовой метки. При моделировании нечеткой системы авторами были применены две модели дефаззификации: на основе метода центра тяжести и на основе отношения площадей [8-13].

В трудах [14-15] авторы рассматривают различные аспекты, позволяющие улучшить качество полученной карты глубины. В статье рассмотрено построение модернизированного фильтра Канни. Модернизация заключается в разработке новых правил и формул для определения принадлежности пикселя к границе в диапазоне направления угла градиента от 0 до 360 градусов. Полученные данные после обработки стереоизображения являются входной информацией для нечеткой иерархической математической модели построения карт глубины.

Авторами рассматривается задача уменьшения вычислительной сложности методов выделения контуров на изображениях [16]. Решение поставленной задачи достигается модификацией детектора Канни двумя нечетко-логическими методами, позволяющими сократить число проходов по исходному изобра-

жению. Интеллектуализация процесса детектирования границ осуществляется частичным повтором вычислительных операций, используемых в детекторе Канни, с дальнейшей заменой наиболее сложных вычислительных процедур.

В работе [17] рассматривается процесс формирования математической модели для метода дефаззификации результата в структуре нечеткого вывода [18-21]. Показаны этапы формирования результирующей формулы и даны пояснения по составляющим ее элементам. В заключении представлены временные результаты работы метода отношения площадей, запрограммированного на программируемой логической интегральной схеме.

В этих исследованиях для решения использовался метод центра тяжести. Общим недостатком данного метода является отсутствие аддитивности. Это снижает информационную составляющую нечеткого вывода.

В данной статье предложен метод распознавания цвета, основанный на нечетком выводе Мамдани, отличительной чертой которого является использование модифицированного метода отношения площадей на этапе дефаззификации.

## Материалы и методы

Метод распознавания цвета, с помощью нечеткой MISO-системы реализован в виде следующей последовательности шагов.



где  $r$  – значение красного оттенка;  $g$  – значение зеленого оттенка;  $b$  – значение синего оттенка. Значения  $r, g, b$  соответствуют координатам RGB модели и варьируются от 0 до 255. Где  $\max$  – наибольшее значение из  $r, g, b$ ,  $\min$  – наименьшее значение из  $r, g, b$ .

$$s = \begin{cases} 0, & \text{если } \max=0; \\ \frac{240 \times \left( \frac{255}{\max} - \frac{255}{\min} \right)}{1 - \left| 1 - \left( \frac{255}{\max} - \frac{255}{\min} \right) \right|}, & \\ \text{в любом другом случае.} \end{cases} \quad (2)$$

**Шаг 2.** Формирование функций принадлежности. После получения данных с датчиков, а также их преобразования, получают два четких значения тона  $H$  и насыщенности  $S$ .

Значения распределяются с помощью треугольных функций для насыщенности (рис. 2) и тона (рис. 3).

Входные переменные нечеткой MISO-системы задаются треугольной функцией принадлежности выполняется по формуле:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a < x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } b < x < c; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $x$  – входящий сигнал  $H$  или  $S$  поступающий от датчиков. Переменные  $a, b, c$  – вершины треугольной функции, которые подбираются в зависимости от требуемого вида треугольной функции принадлежности.

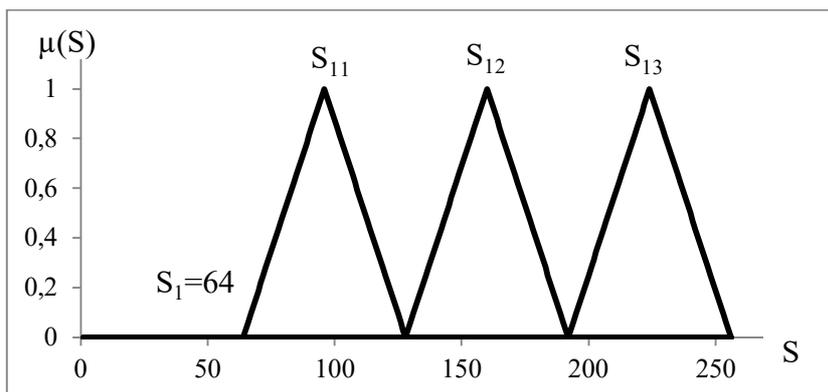


Рис. 2. Функция принадлежности насыщенности

Fig. 2. Saturation membership function

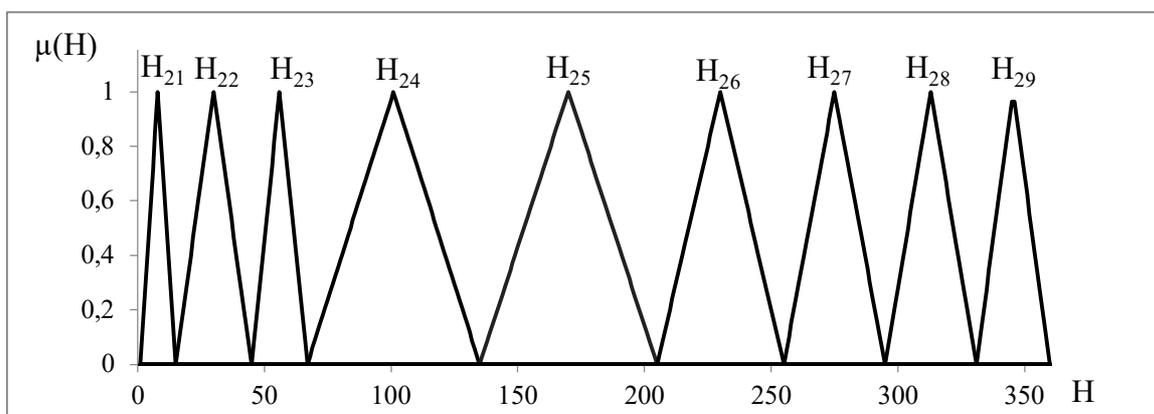


Рис. 3. Функция принадлежности цветового тона

Fig. 3. Hue membership function

Каждая из входных переменных насыщенности задается 3 функциями принадлежности, которые имеют метки, отображенные в табл. 1.

Входные переменные цветового тона задаются 9 функциями принадлеж-

ности, которые имеют метки, отображенные в табл. 2.

Для удобства определения цвета была взята цветовая схема и разделена на 27 секторов (рис.4) соответствующих функциям принадлежности – 3 уровня насыщенности и 9 уровней цветового тона.

**Таблица 1.** Метки функции принадлежности насыщенности

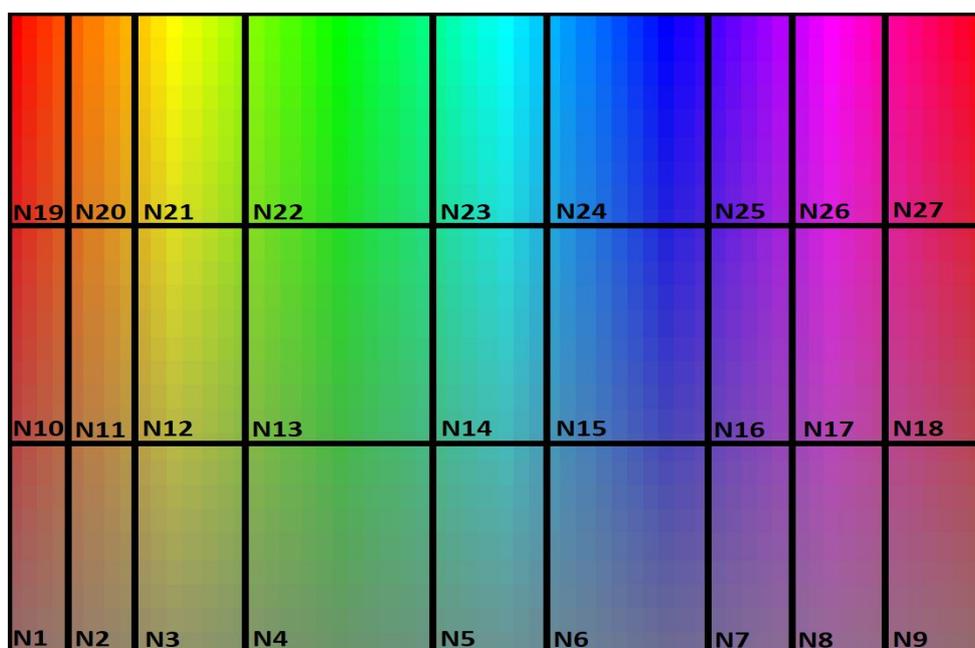
**Table 1.** Saturation membership function labels

Функции принадлежности насыщенности / Saturation membership functions		
$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$
(82;96;128)	(128;160;192)	(192;224;256)

**Таблица 2.** Метки функции принадлежности цветового тона

**Table 2.** Hue membership function labels

Функции принадлежности цветового тона / Color tone accessory functions		
$H_{21}$	$H_{22}$	$H_{23}$
(1;8;15)	(15;30;45)	(45;56;67)
$H_{24}$	$H_{25}$	$H_{26}$
(67;101;135)	(135;170;205)	(205;230;255)
$H_{27}$	$H_{28}$	$H_{29}$
(255;275;295)	(295;313;330)	(330;345;360)



**Рис. 4.** Разделенная на сектора цветовая схема

**Fig. 4.** Sectorized color scheme

В итоге выделили 27 выходных переменных, соответствующих заданным секторам, и распределили их значения от 100 до 2700:  $N_1(100)$ ;  $N_2(200)$ ;  $N_3(300)$ ;  $N_4(400)$ ;  $N_5(500)$ ;  $N_6(600)$ ;  $N_7(700)$ ;  $N_8(800)$ ;  $N_9(900)$ ;  $N_{10}(1000)$ ;  $N_{11}(1100)$ ;  $N_{12}(1200)$ ;  $N_{13}(1300)$ ;  $N_{14}(1400)$ ;  $N_{15}(1500)$ ;  $N_{16}(1600)$ ;  $N_{17}(1700)$ ;  $N_{18}(1800)$ ;  $N_{19}(1900)$ ;  $N_{20}(2000)$ ;  $N_{21}(2100)$ ;  $N_{22}(2200)$ ;  $N_{23}(2300)$ ;  $N_{24}(2400)$ ;  $N_{25}(2500)$ ;  $N_{26}(2600)$ ;  $N_{27}(2700)$ .

**Шаг 3.** Формирование нечётких правил. Нечеткие правила задаются в виде:

$$\text{If } \mu(S_n) \text{ and } \mu(H_n), \text{ Then } N_n, \quad (4)$$

где  $\mu(S_n)$  – значение функции насыщенности;  $\mu(H_n)$ , – значение функции цветового тона;  $N_n$  – значение соответствующие сектору на цветовой схеме.

Формируется база правил данной модели которая отображена в табл. 3. Модель насчитывает 27 правил, каждое из которых выдает уникальный результат.

**Таблица 3.** База правил нечетко-логической модели распознавания цвета

**Table 3.** The rule base of the fuzzy-logical model of color recognition

R <sub>1</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{21}$ » То « $N_1$ »	R <sub>10</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{21}$ » То « $N_{10}$ »	R <sub>19</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{21}$ » То « $N_{19}$ »
R <sub>2</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{22}$ » То « $N_2$ »	R <sub>11</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{22}$ » То « $N_{11}$ »	R <sub>20</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{22}$ » То « $N_{20}$ »
R <sub>3</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{23}$ » То « $N_3$ »	R <sub>12</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{23}$ » То « $N_{12}$ »	R <sub>21</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{23}$ » То « $N_{21}$ »
R <sub>4</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{24}$ » То « $N_4$ »	R <sub>13</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{24}$ » То « $N_{13}$ »	R <sub>22</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{24}$ » То « $N_{22}$ »
R <sub>5</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{25}$ » То « $N_5$ »	R <sub>14</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{25}$ » То « $N_{14}$ »	R <sub>23</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{25}$ » То « $N_{23}$ »
R <sub>6</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{26}$ » То « $N_6$ »	R <sub>15</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{26}$ » То « $N_{15}$ »	R <sub>24</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{26}$ » То « $N_{24}$ »
R <sub>7</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{27}$ » То « $N_7$ »	R <sub>16</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{27}$ » То « $N_{16}$ »	R <sub>25</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{27}$ » То « $N_{25}$ »
R <sub>8</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{28}$ » То « $N_8$ »	R <sub>17</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{28}$ » То « $N_{17}$ »	R <sub>26</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{28}$ » То « $N_{26}$ »
R <sub>9</sub>	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{29}$ » То « $N_9$ »	R <sub>18</sub>	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{29}$ » То « $N_{18}$ »	R <sub>27</sub>	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{29}$ » То « $N_{27}$ »

Далее выполняется композиционное правило вида:

$$M = \min(\mu(S_n); \mu(H_n)), \quad (5)$$

где  $\mu(S_n)$  – значение первой входящей переменной;  $\mu(H_n)$  – значение второй входящей переменной. Результирующая

М будет использоваться в следующем этапе получения четкого значения.

#### Шаг 4. Вычисление четкого значения.

На следующем этапе производится вычисление четких значений или дефазификация – получение четкой формы представления выходного значения (отклика) нечеткой системы. Существует большое количество методов дефазификации – в данном методе используется модифицированный метод отношения площадей:

$$\mu = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \cdot (Y_{\max} - Y_i) \right] + Y_i, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^n M_i$  – сумма результирующих значений нечетких правил;  $n$  – число нечетких правил;  $Y_{\max}$  – максимальное значение выходной функции;  $Y_i$  – значение выходной функции определенное нечеткими правилами.

#### Результаты и их обсуждение

Для наглядного отображения результата работы данного метода дефазификации была построена поверх-

ность, которая отображает все возможные результаты определения цветов (рис. 5).

При вычислении цвета по формуле метода отношения площадей – значения выравниваются на пиках выходных переменных, из-за чего цвета перестают определяться друг от друга. Данный недостаток виден на рис. 6. Модифицированный метод (см. формулу (6)) исправляет данный недостаток, что видно на рис. 5.

При вычислении цветового оттенка по формуле метода центра тяжести проявляются зоны нечувствительности нечеткой системы для выходной переменной, из-за чего выходная переменная не определяется во всем имеющемся для нее диапазоне. Это также может спровоцировать ошибочный расчет на грацах цветов. Данный недостаток виден на рис. 7, поверхность по границам значений не выдает результирующих значений. Разработанный метод исправляет данный недостаток.

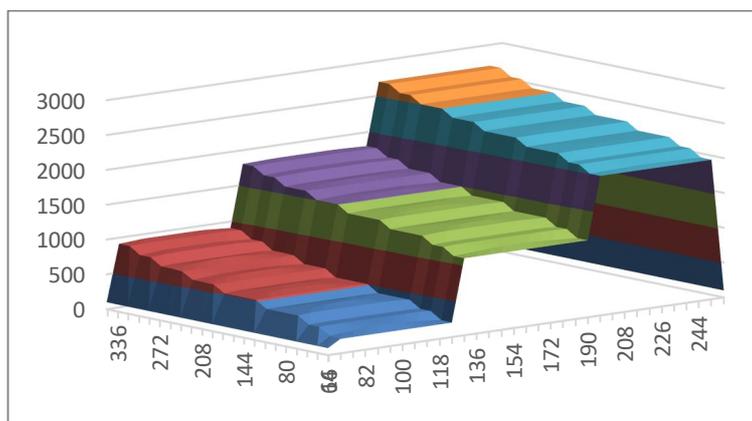
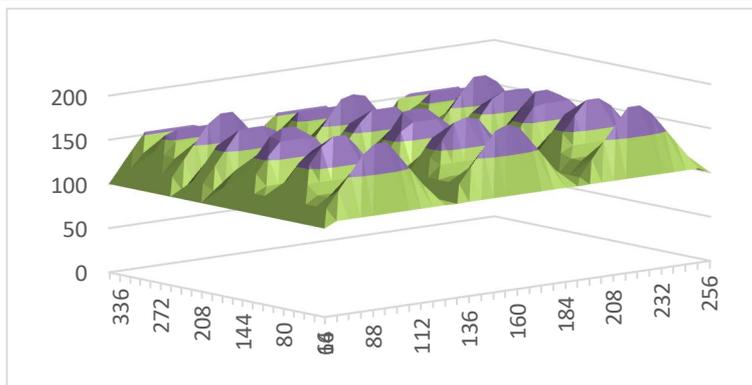


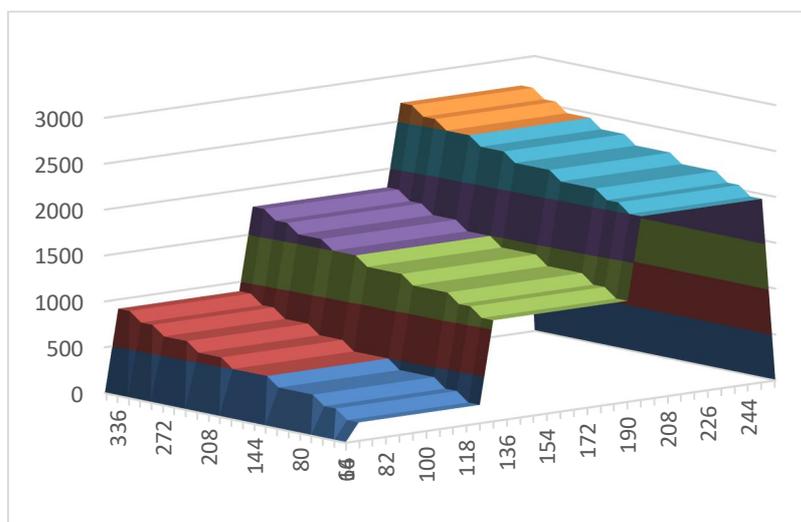
Рис. 5. Поверхность, построенная модифицированным методом отношения площадей

Fig. 5. Surface constructed by the modified area ratio method



**Рис. 6.** Поверхность, построенная методом отношения площадей

**Fig. 6.** Surface constructed by the area ratio method



**Рис. 7.** Поверхность, построенная методом центра тяжести

**Fig. 7.** Surface constructed using the center of gravity method

Достоинства данного метода определяются возможностью четкого градуирования цветов по цветовой схеме, четкое определение цветового диапазона по схеме RGB и кластеризация по заданному диапазону, а также чувствительность системы ко всему диапазону спектра.

Недостаток данного метода заключается в необходимости расширения входящих значений и базы правил в том случае, если нам понадобится определять большее количество цветовых оттенков.

Также был рассчитан корень среднеквадратической ошибки (7) традиционных систем нечеткого вывода и разработанного модифицированного метода отношения площадей (см. формулу (6)). Результаты расчетов отображены в табл. 2.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y - y_{\text{этал}})^2}{N}}, \quad (7)$$

где  $(y - y_{\text{этал}})$  – это разности между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными изучаемой моделью;  $N$  – количество разностей.

**Таблица 4.** Результаты расчета корня среднеквадратической ошибки**Table 4.** Results of calculating the root of the mean square error

	Модификация метода отношения площадей / Modification of the area ratio method	Метод отношения площадей / Area ratio method	Метод центра тяжести / Center of Gravity method
Процент чувствительности системы	100%	100%	95%
RMSE	1.17	3.2	2.08

По результатам вычислений видно, что процент площади реагирующей поверхности выше. Такое явление происходит из-за нарушения принципа суперпозиции в традиционных методах.

### Выводы

Разработаны и описаны нечетко-логическая система распознавания цвета, основанная на нечетком выводе Мамдани, отличительной чертой которого является использование модифицированного метода отношения площадей на этапе дефаззификации и ее математическая модель, состоящая из 4 шагов, которая гарантирует четкое определение 9 цветов и позволяет распознавать их оттенки.

Сделан вывод, что разработанный метод реагирует на промежутке всей поверхности выходящих переменных, в то время как традиционные методы имеют зоны нечувствительности к изменению входящих переменных. Метод центра тяжести реагирует на 5% хуже методов отношения площадей. Также у разработанного метода улучшена точность: почти в 2 раза по сравнению с методом центра тяжести и в 3 с традиционным методом отношения площадей.

Таким образом, экспериментально установлено, что предложенный метод распознавания цвета показал лучший результат по сравнению с традиционными системами нечеткого вывода.

### Список литературы

1. Бобырь М.В., Белозеров А.П. Алгоритм распознавания цветowych маркеров // Промышленные АСУ и контроллеры. 2022; № 2: 30-35. DOI 10.25791/asu.2.2022.1348.
2. 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, 107378, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.

3. Bobyr M.V., Emelianov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 88, 106030, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.

4. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. Система лазерного контроля обработки деталей в реальном времени // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2005. № 11: 21-24.

5. Бобырь М.В., Титов В.С., Беломестная А.Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 6: 38-41.

6. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // *Информатика и автоматизация*. 2021. № 2 (20): 407-434.

7. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012; № 6: 21-26.

8. Bobyr' M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2015. 44: 633–641 <https://doi.org/10.3103/S1052618815070067>

9. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.

10. Гридин В.Н., Титов В.С., Труфанов М.И. Адаптивные системы технического зрения. М.: Наука, 2009.

11. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Математическая модель для нового метода Дефаззификации в структуре нечеткого вывода // *Мехатроника, автоматика и робототехника: сборник научных трудов международной научно-практической конференции*. Новокузнецк, 2018.; С.218-220.

12. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015; №9: 32– 41.

13. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification // *Fuzzy Sets Syst.* 1999; № 108: 159–178.

14. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канны. Часть 1 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, Ц. Цао // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021; № 4: 12-20. DOI 10.25791/asu.4.2021.1271. EDN DQRLLK.

15. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канны. Часть 2 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, С. Бхаттачарья // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021; № 5: 3-15. DOI 10.25791/asu.5.2021.1277. EDN VOZBTI.

16. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, С. В. Горбачев [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2022; Т. 21. № 2: 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6. EDN YSFCPD.

17. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Математическая модель для нового метода Дефаззификации в структуре нечеткого вывода // Мехатроника, автоматика и робототехника: сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2018. С. 218-220.

18. Vuong P. T., Madni A. M., Vuong J. B. VHDL implementation for a fuzzy logic controller. In 2006 World Automation Congress, WAC'06. IEEE Computer Society. 2006.

19. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. АСУ прогнозированием точности обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008; № 4: 3-4.

20. Бобырь М. В., Милостная Н. А., Ноливос К. А. Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД регулятора в задаче управления термоэлементом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022; Т. 23. № 9: 473-480. DOI 10.17587/mau.23.473-480. EDN RJUSI.

21. Bobyr M. V. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA / M. V. Bobyr, A. S. Yakushev, A. A. Dorodnykh // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378. EDN DGESDX.

22. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

## References

1. Bobyr M.V., Belozеров A.P. Algoritm raspoznavaniya tsvetovykh markerov [Algorithm for recognition of color markers]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2022, no. 2, pp. 30-35. DOI 10.25791/asu.2.2022.1348.

2. 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, 107378, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.

3. Bobyr M.V., Emelianov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, 106030, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.

4. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Sistema lazernogo kontrolya obrabotki detalei v real'nom vremeni [System of laser control of parts processing in real time]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2005, no. 11, pp. 21-24.

5. Bobyr M.V., Titov V.S., Belomestnaya A.L. Stabilizatsiya teplovogo rezhima v protsesse rezaniya [Stabilization of thermal regime in the cutting process]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2010, no. 6, pp. 38-41.

6. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Yakushev A.S. Raspoznavanie ottenka tsvetovoi metki na osnove nechetkoi klasterizatsii [Color label hue recognition based on fuzzy clustering]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, no. 2 (20), pp. 407-434.

7. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Algoritm vysokoskorostnoi obrabotki detalei na osnove nechetkoi logiki [Algorithm for high-speed details processing based on fuzzy

logic]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2012, no. 6, pp. 21-26.

8. Bobyr M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2015; 44: 633–641. <https://doi.org/10.3103/S1052618815070067>

9. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob"ektov upravleniya* [Systems with fuzzy models of control objects]. Smolensk, SFRUK Publ., 2013, 153 p.

10. Gridin V.N., Titov V.S., Trufanov M.I. *Adaptivnye sistemy tekhnicheskogo zreniya* [Adaptive vision systems]. Moscow, Nauka Publ., 2009.

11. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. [Mathematical model for the new Defuzzification method in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Mechatronics, automation and robotics. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2018, pp. 218-220 (In Russ.).

12. 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.

13. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets Syst*, 1999, no. 108, pp.159–178.

14. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Tsao Ts. Postroenie karty glubiny s ispol'zovaniem modernizirovannogo fil'tra Kanni Chast' 1 [Depth Mapping Using the Modernized Canny Filter. Part 1]. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2021, no. 4, pp. 12-20. DOI 10.25791/asu.4.2021.1271. EDN DQRLK.

15. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Bhattacharya S. Postroenie karty glubiny s ispol'zovaniem modernizirovannogo fil'tra Kanni. Chast' 2 [Depth Mapping Using the Modernized Canny Filter. Part 2]. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2021, no. 5, pp. 3-15. DOI 10.25791/asu.5.2021.1277. EDN VOZBTI.

16. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Gorbachev S. V. [et al.] Nechetko-logicheskie metody v zadache detektirovaniya granits ob"ektov [Fuzzy-logical methods in the problem of detecting the boundaries of objects]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6. EDN YSFCPD.

17. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. [Mathematical model for the new Defuzzification method in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Mechatronics, automation and robotics. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2018, pp. 218-220 (In Russ.).

18. Vuong P. T., Madni A. M., Vuong J. B. VHDL implementation for a fuzzy logic controller. In 2006 World Automation Congress, WAC'06. IEEE Computer Society. 2006.

19. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei [ACS for predicting the accuracy of processing parts]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2008, no. 4, pp. 3-4.

20. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Nolivos K. A. Kombinatsiya nechetko-tsifrovogo fil'tra i PID regul'yatora v zadache upravleniya termoelementom [Combination of fuzzy-digital filter and PID controller in the problem of thermoelement control]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2022, vol. 23, no. 9, pp. 473-480. DOI 10.17587/mau.23.473-480. EDN RJIUSI.

21. 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, pp. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378. EDN DGESDX.

22. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow, BINOM. Knowledge Lab. Publ., 2013, 798 p.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Емельянов Сергей Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, ректор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

**Sergei G. Emelianov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

**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), Associate 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

**Бондаренко Богдан Андреевич**, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sikersinko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5415-9015>, Researcher ID: HGV-0751-2022

**Bogdan A. Bondarenko**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sikersinko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5415-9015>, Researcher ID: HGV-0751-2022

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>

## Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения

Ю.А. Халин <sup>1</sup> ✉, А.И. Катыхин <sup>1</sup>, С.А. Зинкин <sup>2</sup>, А.А. Шилин <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет  
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
пр. Ленина, д. 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Главной целью данной работы является повышение эффективности автоматизированного игрового обучения на основе когнитивного моделирования. На основе методики системного анализа и когнитивного моделирования слабо структурированных ситуаций предложена структура игрового автоматизированного обучающего комплекса, который может быть использован при обучении персонала в различных предметных областях. В нашем случае проводилось моделирование обучения персонала в условиях стереотипных и нестереотипных ситуаций.

**Методы.** В основе данной работы лежат общие положения теории систем и системного анализа, математической теории графов (основой которой является когнитивное моделирование). Основным инструментом когнитивного моделирования являлось построение нечётких когнитивных карт Силова. Предложена модификация алгоритма расчёта основных системных показателей нечёткой когнитивной карты. Для автоматизированного обучения использовалось игровое моделирование, основу которого составляли деловые игры. Вводилось понятие «оперативная игра», далее осуществлялось моделирование развития некоторой неблагоприятной ситуации с помощью нечётких когнитивных карт.

**Результаты.** Основным результатом данной работы является методика когнитивного моделирования информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения. На основе разработанной методики было проведено игровое имитационное моделирование оперативной игры «Пожар в доме», в основе которой лежало построение нечёткой когнитивной карты, для которой были рассчитаны основные количественные системные показатели взаимного влияния, консонанса и диссонанса.

**Заключение.** Разработанная методика позволяет проводить игровое моделирование неблагоприятных (в том числе чрезвычайных) ситуаций, что в дальнейшем обеспечит адекватное поведение обучающихся в реально возникших ситуациях.

**Ключевые слова:** обучающие системы; игровое моделирование; деловая игра; оперативная игра; когнитивные карты; чрезвычайная ситуация.

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

© Халин Ю.А., Катыхин А.И., Зинкин С.А., Шилин А.А., 2022

Для цитирования: Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения / Халин Ю.А., Катыхин А.И., Зинкин С.А., Шилин А.А. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.

Поступила в редакцию 26.08.2022

Подписана в печать 05.10.2022

Опубликована 14.10.2022

## Cognitive Modeling of Information Support for Game-Based Automated Learning

Yuri A. Khalin <sup>1</sup>✉, Alexander I. Katykhin <sup>1</sup>, Sergey A. Zinkin <sup>2</sup>,  
Alexander A. Shilin <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Penza State University  
40, Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Ave Lenin, Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The main goal of this work is to increase the efficiency of automated game learning based on cognitive modeling. Based on the methodology of system analysis and cognitive modeling of weakly structured situations, the structure of a gaming automated training complex is proposed, which can be used in training personnel in various subject areas. In our case, staff training was simulated in stereotypical and non-stereotypical situations.

**Methods.** This work is based on the general provisions of systems theory and system analysis, mathematical graph theory (which is based on cognitive modeling). The main tool of cognitive modeling was the construction of fuzzy cognitive maps of Silov. A modification of the algorithm for calculating the main system indicators of a fuzzy cognitive map was proposed. Game modeling, based on business games, was used for automated learning. The concept of an operational game was introduced, then modeling of the development of some unfavorable situation was carried out using fuzzy cognitive maps.

**Results.** The main result of this work is the method of cognitive modeling of information support for game-based automated learning. Based on the developed methodology, a game simulation simulation of the operational game "House Fire" was carried out, which was based on the construction of a fuzzy cognitive map, for which the main quantitative system indicators of mutual influence, consonance and dissonance were calculated.

**Conclusion:** the developed methodology allows for game modeling of unfavorable (including emergency) situations, which in the future will ensure adequate behavior of students in real situations.

**Keywords:** educational systems; game modeling; business game; operational game; cognitive maps; emergency.

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

**For citation.** 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>.

Received 26.08.2022

Accepted 05.10.2022

Published 14.10.2022

## Введение

В настоящее время во всем мире для подготовки различных специалистов к выполнению своих функциональных обязанностей активно разрабатываются и применяются обучающие комплексы [1, 2, 3]. В основе таких комплексов, как правило, лежат какие либо из методов активного обучения, которые интенсивно развиваются в последнее время и повсеместно используются в обучающем процессе.

Среди имитационных методов активного обучения игровые являются наиболее эффективными и могут включать в себя все прочие методы, в зависимости от цели обучения и того насколько это способствуют ее достижению. Игровая форма формирует желаемое поведение обучаемого, дает возможность получать опыт и знания, совершая ошибки при принятии игровых решений, которые могут быть недопустимы в условиях реальной ЧС.

## Материалы и методы

Суть игрового моделирования поведения заключается в том, что в игровой реальности, обучаемый становится перед необходимостью принять то или иное решение. Причем, с точки зрения психологии, для большинства людей действительность и игровая реальность равноценны. То есть, принимая решения в игровой реальности, человек использует все имеющиеся у него знания,

задействует привычные для него потребности и ценности, ориентируясь на известные ему нормы. Кроме того, наблюдая других обучаемых, появляется возможность перенимать знания, сравнивать свою и их реакцию на игровые ситуации. Такое наблюдение способствует формированию навыков, приобретению знаний и опыта.

С целью учета специфики предметной области, в работе введено понятие «оперативная игра» (ОИ), как разновидности игрового метода активного обучения.

В работах [4, 5, 6, 7] представлена структура игрового обучающего комплекса, в соответствии с которой необходимо обеспечить моделирование возникшей оперативной ситуации. Эффективным способом возникшей задачи является применение когнитивных методов. Это обуславливается слабой структурированностью объектов, описывающих возникшую ситуацию<sup>1</sup>.

Центральным понятием при использовании когнитивных методов является когнитивная карта, которая позволяет представить возникшую ситуацию в виде ориентированного знакового графа [8, 9]. Вершинами данного графа являются концепты (объекты и факторы описывающие возникшую си-

---

<sup>1</sup> Лагереv Д.Г. Автоматизация разработки управленческих решений в социально-экономических системах на основе применения нечетких когнитивных моделей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10, Брянск, 2007. 202 с.

туацію), а дуги показывают их взаимное влияние друг на друга, которое может быть положительным, отрицательным или нейтральным. Однако данные классические когнитивные карты позволяли проводить в основном качественный анализ, а для проведения количественного анализа разрабатывались различные модификации, одной из таких модификаций являлись нечёткие когнитивные карты, в которых дуги представляли собой нечёткое отношение предпочтения, в основе которого лежит понятие функции принадлежности.

Существует два подхода к построению нечётких когнитивных карт Силова и Коско [10, 11]. Применительно к нашей задаче будем использовать первый, так как он позволяет более точно учитывать силу взаимного влияния объектов, описывающих возникшую ситуацию (концептов).

В работе [12] показана методика вычисления системных показателей когнитивной карты: влияния концептов друг на друга, совместного и индивидуального консонанса и диссонанса. Предложенная методика основана на сравнении контуров, образованных из концептов карты по критерию соответствия, силы и баланса взаимного влияния. В настоящей работе проведена её адаптация к процессу моделирования типовой оперативной ситуации, используемой для автоматизированного обучения.

На рис. 1 представлен фрагмент нечёткой когнитивной карты Силова.

Концепт  $A$ , проводящий оценку, подвержен влиянию концептов  $C_1, C_2, \dots, C_k$ , однако и сам влияет на концепты  $B_1, B_2, \dots, B_m$ . В результате получаем два нечётких множества, для которых следует построить функции принадлежности [12, 13, 14]:

$$A_{\rightarrow} = \{ w_1/B_1, w_2/B_2, \dots, w_m/B_m \}, \quad (1)$$

$$A_{\leftarrow} = \{ p_1/C_1, p_2/C_2, \dots, p_k/C_k \}. \quad (2)$$

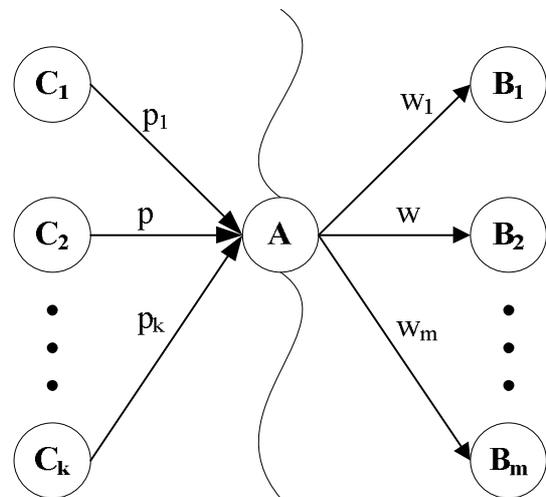


Рис. 1. Нечеткое множество концептов

Fig. 1. Fuzzy set of concepts

На следующем этапе, для описания опосредованных взаимных влияний концептов, был предложен модифицированный алгоритм расчета системных характеристик когнитивной карты с помощью определения транзитивного замыкания [6, 15, 16].

**Шаг 1.** Преобразование исходной нечёткой когнитивной карты с положительно-отрицательными нечёткими связями, к нечёткой матрице положительных связей  $R$  размерностью  $2n \times 2n$  ( $n$  - число вершин) путем следующей замены:

$$\begin{aligned} w_{ij} > 0 &\Rightarrow r_{2i-1,2j-1} = w_{ij}, r_{2i,2j} = w_{ij}, \\ w_{ij} < 0 &\Rightarrow r_{2i-1,2j} = -w_{ij}, r_{2i,2j-1} = -w_{ij}. \end{aligned} \quad (3)$$

Остальные элементы матрицы  $R$  принимают нулевое значение.

Шаг 2. Определение транзитивного замыкания нечеткого отношения  $R$ :

1) Расчёт матрицы  $R^2$  по формуле:

$$R^2 = R \circ R, \quad (4)$$

произведение матриц вычислим по следующей схеме:

если  $C = A \circ B$ , то

$$c_{ij} = \max_{k=1, \dots, n} \{a_{ik} b_{kj}\} \quad (i, j = 1, \dots, n). \quad (5)$$

Аналогично вычисляются матрицы:  $R^3, \dots, R^n$ . (где  $n$  – число концептов). Найдем  $R^3 = R \circ R^2$  и т.д.

2) Определение транзитивного замыкания нечеткого отношения  $R$ :

$$\tilde{R} = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n, \quad (6)$$

расчет каждого элемента можно производить используя:

$$\tilde{r}_{ij} = \max \{r_{ij}, r_{ij}^2, r_{ij}^3, \dots, r_{ij}^n\} \quad (i, j = 1, \dots, n), \quad (7)$$

где  $n$  – число концептов;

$r_{ij}^2$  – элемент матрицы  $R^2$ , стоящий на пересечении  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца;

$r_{ij}^3$  – элемент матрицы  $R^3$  и т.д.

Шаг 3. Преобразование матрицы матрицы  $\tilde{R}$  к транзитивно замкнутой когнитивной матрице  $Z$ , элементами которой являются пары  $(z_{ij}, \bar{z}_{ij})$ , где  $z_{ij}$  характеризует силу положительного влияния, а  $\bar{z}_{ij}$  – силу отрицательного влияния  $i$ -го концепта на  $j$ -й:

$$\begin{aligned} z_{ij} &= \max(\tilde{r}_{2i-1,2j-1}, \tilde{r}_{2i,2j}), \\ \bar{z}_{ij} &= -\max(\tilde{r}_{2i-1,2j}, \tilde{r}_{2i,2j-1}). \end{aligned} \quad (8)$$

Элементы полученной матрицы  $Z$  используются для расчёта системных показателей нечёткой когнитивной карты, характеризующих динамику решения одной или нескольких частных задач в условиях оперативной ситуации [17, 18, 11].

1. Влияние (воздействие)  $i$ -го концепта на  $j$ -й определяется следующим образом:

$$p_{ij} = \text{sign}(z_{ij} + \bar{z}_{ij}) \max(|z_{ij}|, |\bar{z}_{ij}|), |z_{ij}| \neq |\bar{z}_{ij}|, \quad (9)$$

где  $z_{ij}$  – сила положительного влияния  $i$ -го концепта на  $j$ -й,

$\bar{z}_{ij}$  – сила отрицательного влияния

$i$ -го концепта на  $j$ -й,

$\text{sign}(x)$  – функция, возвращающая знак выражения  $x$ .

Взаимное положительное влияние является рефлексивным:

$$\tilde{P}_{ij} = \tilde{P}_{ji} = z_{ij} S z_{ji}. \quad (10)$$

Консонанс влияния концептов друг на друга, показывающий меру доверия к направлению (знаку) и силе взаимодействия (чем выше консонанс, тем убедительнее мнение):

$$c_{ij} = \frac{|z_{ij} + \bar{z}_{ij}|}{|z_{ij}| + |\bar{z}_{ij}|}. \quad (11)$$

Консонанс влияния концептов друг на друга:

$$\tilde{c}_{ij} = \tilde{c}_{ji} = \frac{|(z_{ij} + z_{ji}) + (\bar{z}_{ij} + \bar{z}_{ji})|}{|(z_{ij} + z_{ji})| + |(\bar{z}_{ij} + \bar{z}_{ji})|}, \quad (12)$$

Диссонанс взаимного влияния. Является нечетким дополнением консонанса:

$$d_{ij} = 1 - c_{ij}. \quad (13)$$

Диссонанс взаимного влияния  $i$ -го и  $j$ -й концептов:

$$\vec{d}_{ij} = \vec{d}_{ji} = 1 - \vec{c}_{ij}. \quad (14)$$

Полученные показатели позволяют проводить анализ сложных ситуаций и процессов.

## Результаты и их обсуждение

Применим описанную в работе методику для обучения населения поведения и действия в пожароопасных ситуациях, основанную на автоматизированном игровом обучении [16, 7, 19, 17, 20]. Для описанной ситуации когнитивная карта представлена на рис. 2.

В табл. 1 представлены основные объекты чрезвычайной ситуации (ОЧС) выбранной задачи в виде концептов.

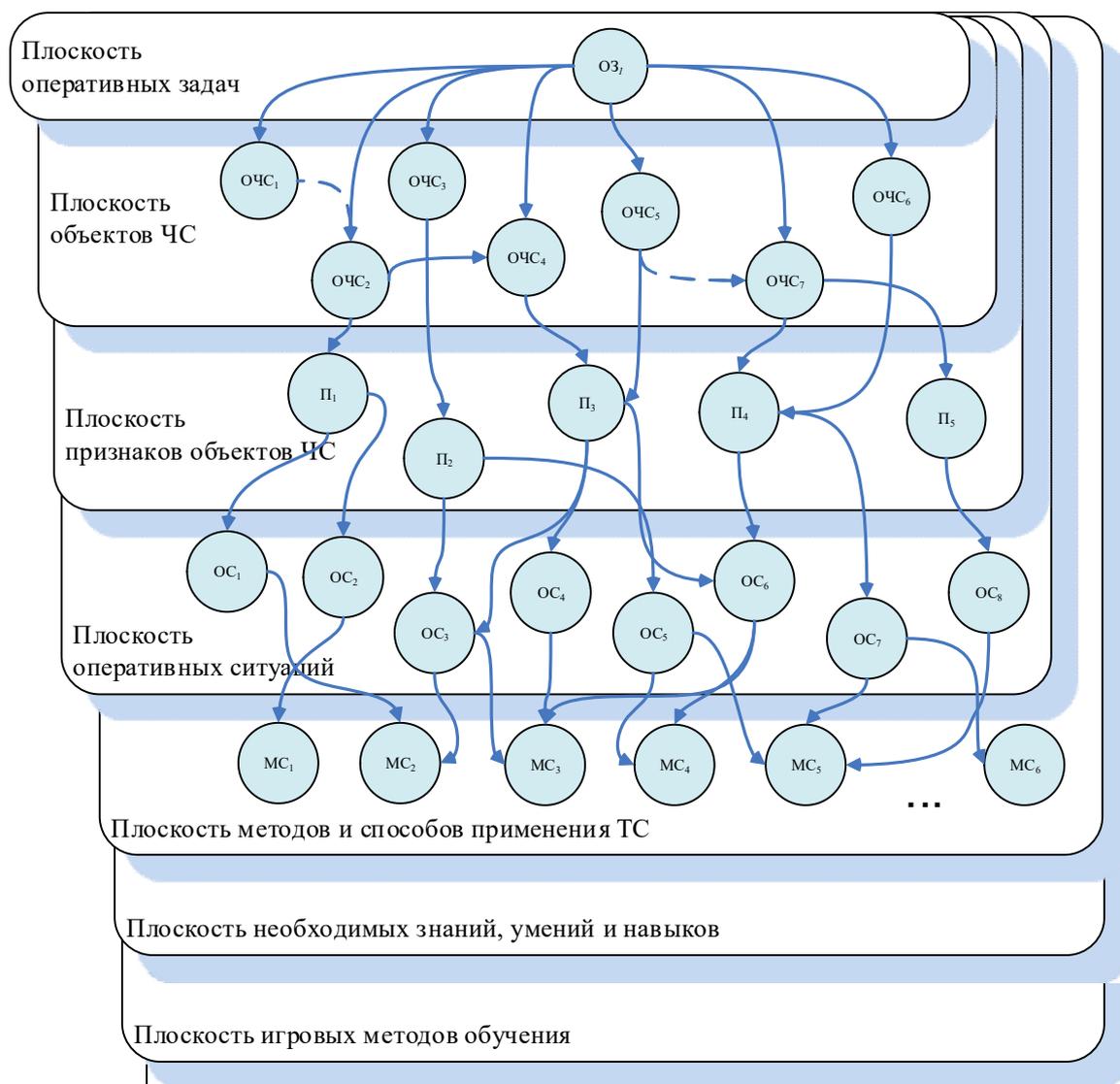


Рис. 2. Когнитивная карта организации пожаротушения

Fig. 2. Cognitive map of fire extinguishing organization

**Таблица 1.** ОЧС пожара в квартире**Table 1.** Points of fire in the apartment

Концепт / Concept	Наименование фактора / Name of the factor
ОЧС <sub>1</sub>	Электрогирлянда
ОЧС <sub>2</sub>	Электроприбор 2
ОЧС <sub>3</sub>	Мебель
ОЧС <sub>4</sub>	Ковер
ОЧС <sub>5</sub>	Окно
ОЧС <sub>6</sub>	Балкон
ОЧС <sub>7</sub>	Электрощитовая
ОЧС <sub>8</sub>	Водопровод
ОЧС <sub>9</sub>	Соседи

Представление информации о признаках ОЧС, указанных в табл. 2, может быть в виде текста, изображения, аудио, видео.

**Таблица 2.** Признаки ОЧС**Table 2.** Signs of OCHS

Концепт / Concept	Наименование фактора / Name of the factor
П <sub>1</sub>	Огонь
П <sub>2</sub>	Температура в помещении
П <sub>3</sub>	Концентрация отравляющих веществ
П <sub>4</sub>	Задымленность
П <sub>5</sub>	Взрыв
П <sub>6</sub>	Паника
П <sub>7</sub>	Шок
П <sub>8</sub>	Удушье
П <sub>9</sub>	Обморок

Действия человека по тушению пожара и проведению АСР, связанных с тушением пожаров, начинаются с мо-

мента идентификации возгорания и считаются законченными при полной ликвидации признаков огня и включают в себя этапы (оперативные ситуации), представленные в табл. 3.

**Таблица 3.** Оперативные ситуации**Table 3.** Operational situations"

Концепт / Concept	Наименование ситуации / Name of the situation
ОС <sub>1</sub>	Отключение электроэнергии
ОС <sub>2</sub>	Самостоятельное тушение пожара
ОС <sub>3</sub>	Звонок пожарной охране
ОС <sub>4</sub>	Эвакуация
ОС <sub>5</sub>	Возгорание одежды
ОС <sub>6</sub>	Укрытие на балконе или около окна

В соответствии с когнитивной картой тушения пожара в квартире определим методы и способы применения ТС (табл. 4).

Оперативная игра – «Пожар в доме»

Игра проводится с целью получения навыков поведения при пожаре в помещении. Является средством активизации и усиления практической направленности изучения курса «Основы безопасности жизнедеятельности».

Участниками являются учащиеся общеобразовательных школ, лицеев.

Сформируем упражнение уровня «стереотипных ситуаций». Обучаемому предлагается выбрать и разместить средства тушения пожара на схеме учитывая условия выполнения задачи и це-

лесообразность их применения при проведении пожаротушения на данном объекте.

**Таблица 4.** Плоскость методов и способов применения ТС

**Table 4.** The plane of methods and methods of application of the vehicle

Концепт / Concept	Наименование фактора / Name of the factor
$C_1$	Тушение пожара водой
$C_2$	Тушение пожара песком
$C_3$	Тушение пожара огнетушителем порошковым
$C_4$	Тушение пожара огнетушителем пенным
$C_5$	Поиск телефона
$C_6$	Вызов пожарной охраны
$C_7$	Обращение за помощью к соседям
$C_8$	Уплотнение двери
$C_9$	Самозащита от огня
$C_{10}$	Отключение электроприбора от сети
$C_{11}$	Отключение электричества в доме

*Сценарий возникновения ЧС.* В многоквартирном доме в результате неисправности блока питания произошло возгорание электрогирлянды. Создалась угроза распространения пожара на ковер, мебель комнаты.

Определим фазы проведения оперативной игры (табл. 5).

Описание оперативной ситуации в целом является весьма громоздким и выходит за рамки работы, поэтому остановимся на выборе только некоторых из множества значимых факторов,

перечисленных в последующих таблицах. Выбранные факторы, их начальные и целевые значения (условия упражнения) для фазы №2 приведены в табл. 6.

**Таблица 5.** Фазы оперативной игры

**Table 5.** Operational game phases

Фаза / Phase	Описание / Description
$\Phi_1$	Обнаружение пожара
$\Phi_2$	Попытка самостоятельно потушить пожар.
$\Phi_3$	Вызов пожарной охраны
$\Phi_4$	Эвакуация
$\Phi_5$	Возгорание одежды
$\Phi_6$	Укрытие
$\Phi_7$	Ликвидация пожара

Далее построим нечёткую когнитивную карту возникшей ситуации (рис. 3).

Интенсивности влияния представлены в табл. 7.

В построенной нечеткой когнитивной карте представлены наиболее важные, непосредственные связи между концептами (т.е. связи, которые существуют в «явном» виде). Для анализа всех причинно-следственных связей концептов описанной оперативной ситуации необходимо также получение информации об их опосредованном взаимовлиянии.

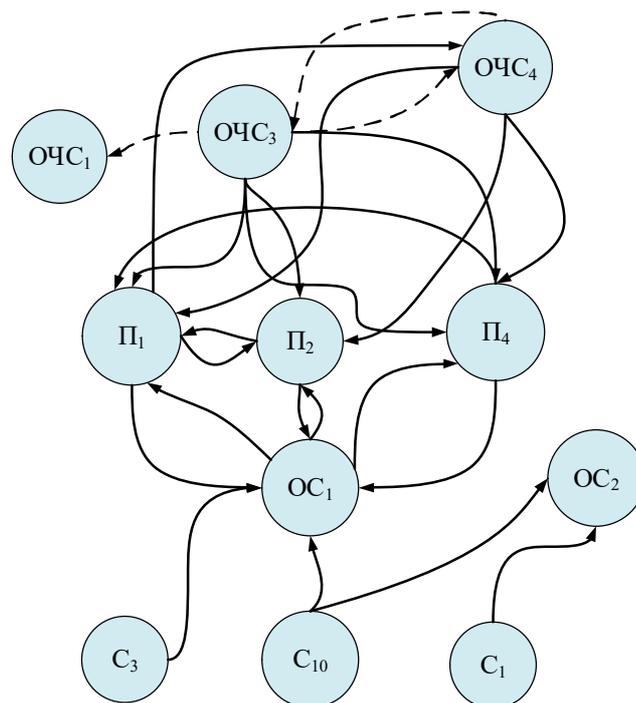
Если в когнитивной карте имеется путь, содержащий как положительно, так и отрицательно взвешенные дуги, то наличие и характер влияния между начальной и конечной вершинами пути определяются значениями весов.

**Таблица 6.** Концепты фрагмента оперативной ситуации для фазы №2**Table 6.** Concepts of the operational situation fragment for phase No. 2

Концепт / Concept	Наименование фактора / Name of the factor	Решаемые задачи / Tasks to be solved	Начальный уровень / Entry level	Целевой уровень / Target level /
ОЧС <sub>1</sub>	Электрогирлянда	Пожар должен быть потушен	Низкий	Низкий
ОЧС <sub>3</sub>	Мебель	Пожар должен быть потушен	Средний	Низкий
ОЧС <sub>4</sub>	Ковер	Пожар должен быть потушен	Средний	Низкий
П <sub>1</sub>	Огонь	-	Средняя	Низкая
П <sub>2</sub>	Температура в помещении	-	Средняя	Низкая
П <sub>4</sub>	Задымленность	-	Высокий	Низкий
ОС <sub>1</sub>	Отключение электроэнергии	Отключение электроэнергии от прибор, обесточивание квартиры		
ОС <sub>2</sub>	Самостоятельное тушение пожара	Ликвидация возгорания	Низкий	Высокий
С <sub>1</sub>	Тушение водой	Прекращение горения веществ и материалов	Высокий	Низкий
С <sub>3</sub>	Тушение огнетушителем порошковым	Прекращение горения веществ и материалов	Низкий	Высокий
С <sub>10</sub>	Отключение электроприбора от сети	Отключение электричества от горящего электроприбора	Низкий	Высокий

**Таблица 7.** Нечеткая когнитивная матрица фрагмента ликвидации ЧС**Table 7.** Fuzzy cognitive matrix of an emergency response fragment

Концепт / Concept	ОЧС <sub>2</sub>	ОЧС <sub>3</sub>	ОЧС <sub>4</sub>	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub>	П <sub>4</sub>	ОС <sub>1</sub>	ОС <sub>3</sub>	С <sub>1</sub>	С <sub>3</sub>	С <sub>10</sub>
ОЧС <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ОЧС <sub>3</sub>	0,31	0	0,33	0,59	0,48	0,75	0	0	0	0	0
ОЧС <sub>4</sub>	0	0,43	0	0,62	0,50	0,71	0	0	0	0	0
П <sub>1</sub>	0	0,43	0,43	0	0,8	0	0	0,7	0	0	0
П <sub>2</sub>	0	0,41	0,41	0,8	0	0	0	-0,65	0,52	0	0
П <sub>4</sub>	0	0	0	-0,4	0	0	0	-0,45	0	0	0
ОС <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0	0
ОС <sub>2</sub>	0	0	0	0,8	0,78	0,51	0	0	0,51	0	0
С <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	0,68	0,74	0	0,63	0,65
С <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
С <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



**Рис. 3.** Когнитивная карта фрагмента оперативной игры на фазе 3

**Fig. 3.** Cognitive map of a fragment of an operational game in phase 3

На следующем этапе проводят моделирование оперативной ситуации, в результате которого получают количественные оценки системных показателей соответствующей когнитивной

карты, основными среди которых являются показатели влияния, консонанса и диссонанса, представленные в табл. 8, и консонанса, представленные в табл. 9.

**Таблица 8.** Матрица консонанса влияния концептов

**Table 8.** The matrix of the consonance of the influence of concepts

Концепт / Concept	OЧС <sub>2</sub>	OЧС <sub>3</sub>	OЧС <sub>4</sub>	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub>	П <sub>4</sub>	OС <sub>1</sub>	OС <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>10</sub>
OЧС <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OЧС <sub>3</sub>	0,41	0	0,23	0,49	0,38	0,45	0	0	0	0	0
OЧС <sub>4</sub>	0	0,53	0	0,42	0,60	0,81	0	0	0	0	0
П <sub>1</sub>	0	0,53	0	0	0,8	0	0	0,7	0	0	0
П <sub>2</sub>	0	0,31	0,41	0,8	0	0	0	-0,55	0,32	0	0
П <sub>4</sub>	0	0	0	-0,5	0	0	0	-0,35	0	0	0
OС <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,37	0	0
OС <sub>2</sub>	0	0	0	0,8	0,71	0,31	0	0	0,21	0	0
C <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	0,48	0,74	0	0,53	0,35
C <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Таблица 9.** Системные показатели нечеткой когнитивной карты**Table 9.** System indicators of fuzzy cognitive map

Концепт / Concept	$\bar{C}_i$	$\bar{C}_j$	$\bar{D}_i$	$\bar{D}_j$	$\bar{P}_i$	$\bar{P}_j$
ОЧС <sub>2</sub>	0,5978	0,4061	0,6662	0,8579	0,3323	0,1195
ОЧС <sub>3</sub>	0,6927	0,3783	0,5713	0,8857	0,3098	0,0509
ОЧС <sub>4</sub>	0,8327	0,1851	0,1025	0,4594	0,2145	0,7586
П <sub>1</sub>	0,7994	0,717	0,4646	0,547	0,3926	0,0669
П <sub>2</sub>	0,6174	0,4061	0,6466	0,8579	-0,0333	0,1495
П <sub>4</sub>	0,4841	0,6604	0,7799	0,6036	0,2401	0,1621
ОС <sub>1</sub>	0,7586	0,4313	0,5054	0,8327	0,1851	0,1025
ОС <sub>2</sub>	0,3843	0,4313	0,8797	0,8377	0,3336	0,0952
С <sub>1</sub>	0,2695	0,3785	0,6693	0,4791	0,5166	0,2495
С <sub>3</sub>	0,3784	0,2895	0,6045	0,8565	0,5952	0,4877
С <sub>10</sub>	0,7744	0,5054	0,9545	0,3993	0,3566	0,3786

Формирование развивающего упражнения уровня «нестереотипных ситуаций» рассмотрим, используя ту же модель описанного фрагмента. Обучаемому предлагается принять оперативное решение путем того или иного воздействия на управляемые факторы в условиях изменившегося состояния ситуации.

(Шаг 1). Так, в предложенный фрагмент оперативной ситуации введем импульс – пожар перекинулся на ковер ОЧС<sub>4</sub> (ГСМ), возникновение риска возгорания мебели ОЧС<sub>3</sub>.

В данной ситуации обучаемый может оставить ситуацию без изменений или попытаться самостоятельно ОС<sub>2</sub> потушить возгорание.

(Шаг 2) В помещении возникла сильная задымленность.

В данной ситуации обучаемый может предпринять попытку выйти из помещения, или, если это невозможно,

укрыться в одной из комнат или на балконе ОЧС<sub>6</sub>.

На основе анализа рассчитанных параметров и системы в целом, АИОК визуализирует состояние оперативной ситуации, что дает возможность оценить действия обучаемого на каждом шаге оперативной игры (с точки зрения значимости их результата для решения оперативной задачи) при выполнении учебного упражнения.

## Выводы

В данной работе представлена методика организации обучения обучающихся в условиях пожароопасных ситуаций, основанная на применении когнитивного моделирования. Рассматривается оперативная игра «Пожар в доме», строится когнитивная карта возникшей ситуации и рассчитываются её системные показатели.

### Список литературы

1. Беспалько В.П. Педагогика и прогрессивные технологии обучения. М., 2001.
2. Беспалько В.П. Слагаемые педагогической технологии. М.: Педагогика, 1989.
3. Лернер И.Я. Дидактические основы методов обучения. М., 2004.
4. Сизов А.С., Катыхин А.И., Макеев В.В. Формализация процесса обучения для синтеза структурно-функциональной организации автоматизированной системы обучения на базе игрового комплекса // Известия Курского государственного технического университета. 2010. № 4 (33). С. 66-71.
5. Формализация процесса эвакуации людей из помещения для создания автоматизированной обучающей игровой системы / А.С. Сизов, А.И. Катыхин, В.В. Макеев, В.В. Теплова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 3 (36). С. 45-48.
6. Сизов А.С., Катыхин А.И., Макеев В.В. Подход к автоматизации разработки последовательности изучения учебной программы и генерации творческих задач автоматизированной обучающей системы // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. №11. С. 35-39.
7. Сизов А.С., Катыхин А.И., Макеев В.В. Концептуальная модель автоматизированной системы обучения на основе автоматизированного обучающего комплекса // Материалы XIX межвузовской военно-научной конференции, 25-26 ноября 2010 г. Череповец: Военно-космическая академия им. А.С.Можайского, 2011. С. 177-180.
8. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия - Телеком, 2007. 284 с.
9. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
10. Живенков А.Н. Моделирование информационной системы адаптивного структурирования образовательного контента на основе нечетких сетей Петри // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. 2011. №6.
11. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам: пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 496 с.
12. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС, 1995. 228 с.
13. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Теория и системы управления. 2005.
14. Ягер Р.Р. Множества уровня для оценки принадлежности нечетких подмножеств // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. С. 71-78.
15. Сизов А.С., Катыхин А.И., Смирнов М.Н. Модель представления знаний в игровой автоматизированной обучающей системе // Распознавание – 2010: сб. науч. тр. по матер. IX Междунар. конф., 18-20 мая 2010. Курск: КГТУ, 2010. С. 310-312.

16. Катыхин А.И., Макеев В.В. Системная модель автоматизированного игрового комплекса (АИК) // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. статей по матер. VIII междунар. науч.-техн. конф., 28 декабря 2010 г. Курск, 2011. С. 192 – 196.

17. Сизов А.С., Катыхин А.И., Макеев В.В. Подход к моделированию предметной области для синтеза структуры игровой автоматизированной обучающей системы // Научно-технический сборник НИЦ (г. Курск). Курск, 2010. С. 52-56.

18. Сизов А.С., Катыхин А.И., Макеев В.В. Разработка математических моделей представления данных в информационной базе игрового автоматизированного обучающего комплекса // Инновации в информационно-аналитических системах: сб. науч. трудов. Вып. 1. Курск: Фонд «Науком», 2011. С. 113 – 119.

19. Формализация процесса эвакуации людей из помещений для создания автоматизированной обучающей игровой системы / А.С. Сизов, А.И. Катыхин, В.В. Теплова, В.В. Макеев // Современные информационные технологии: сб. статей по матер. междунар. науч.-техн. конф., 25 мая 2011г. Пенза: Пензенская гос. техн. академия, 2011. С. 77 – 81.

## References

1. Bepalko V.P. *Pedagogika i progressivnye tekhnologii obucheniya* [Pedagogy and progressive learning technologies]. Moscow, 2001.

2. Bepalko V.P. *Slagaemye pedagogicheskoi tekhnologii* [The components of pedagogical technology]. Moscow, Pedagogika Publ., 1989.

3. Lerner I.Ya. *Didakticheskie osnovy metodov obucheniya* [Didactic foundations of teaching methods]. Moscow, 2004.

4. Sizov A.S., Katykhin A.I., Makeev V.V. Formalizatsiya protsessa obucheniya dlya sinteza strukturno-funktsional'noi organizatsii avtomatizirovannoi sistemy obucheniya na baze igrovogo kompleksa [Formalization of the learning process for the synthesis of the structural and functional organization of an automated learning system based on a game complex]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2010, no. 4 (33), pp. 66-71.

5. Sizov A.S., Katykhin A.I., Makeev V.V., Teplova V.V. Formalizatsiya protsessa evakuatsii lyudei iz pomeshcheniya dlya sozdaniya avtomatizirovannoi obuchayushchei igrovoi sistemy [Formalization of the process of evacuation of people from the premises to create an automated learning game system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 3 (36), pp. 45-48.

6. Sizov A.S., Katykhin A.I., Makeev V.V. Podkhod k avtomatizatsii razrabotki posledovatel'nosti izucheniya uchebnoi programmy i generatsii tvorcheskikh zadach avtomatizirovannoi obuchayushchei sistemy [An approach to automating the development of the sequence of studying the curriculum and generating creative tasks of an automated learning system]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and Control Systems*, 2011, no. 11, pp. 35-39.

7. Sizov A.S., Katykhin A.I., Makeev V.V. [Conceptual model of an automated training system based on an automated training complex]. *Materialy XIX mezhvuzovskoi voenno-nauchnoi konferentsii* [Materials of the XIX interuniversity military-scientific conference], Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.S.Mozhaiskogo, 2011, pp. 177-180 (In Russ.).

8. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy models and networks]. Moscow, Goryachaya liniya - Telekom Publ., 2007. 284 p.

9. Vasiliev V.I., Ilyasov B.G. *Intellektual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika* [Intelligent control systems. Theory and practice]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 392 p.

10. Zhivenkov A.N. Modelirovanie informatsionnoi sistemy adaptivnogo strukturirovaniya obrazovatel'nogo kontenta na osnove nechetkikh setei Petri [Modeling of the information system of adaptive structuring of educational content based on fuzzy Petri nets]. *Pribory i sistemy, upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and Systems, Management, Control, Diagnostics*, 2011, no.6

11. Roberts F.S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham* [Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 496 p.

12. Silov V.B. *Prinyatie strategicheskikh reshenii v nechetkoi obstanovke* [Strategic decision-making in a fuzzy environment]. Moscow, INPRO-RES Publ., 1995, 228 p.

13. Fedulov A.S. Nechetkie relyatsionnye kognitivnye karty [Fuzzy relational cognitive maps]. *Teoriya i sistemy upravleniya = Theory and Control Systems*, 2005.

14. Jager P.P. [Level sets for estimating the membership of fuzzy subsets]. *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei. Poslednie dostizheniya* [Fuzzy sets and the theory of possibilities. Recent achievements]. Moscow, 1986, pp. 71-78 (In Russ.).

15. Sizov A.S., Katykhin A.I., Smirnov M.N. [A model of knowledge representation in a gaming automated learning system]. *Raspoznavanie – 2010. Sb. nauch. tr. po mater. IX Mezhdunar. konf.* [Recognition – 2010. Collection of scientific tr. on mater. IX International Conference]. Kursk, KSTU Publ., 2008, pp. 310-312 (In Russ.).

16. Katykhin A.I., Makeev V.V. [System model of an automated gaming complex (AIC)]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii. Sb. statei po mater. VIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations. Collection of articles on mater. VIII International Scientific and Technical conf.]. Kursk, 2011, pp. 192 - 196

17. Sizov A.S., Katykhin A.I., Makeev V.V. [An approach to modeling the subject area for the synthesis of the structure of a gaming automated learning system]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik NITs (g. Kursk)*. [Technical collection of SIC (Kursk)]. Kursk, 2010, pp. 52-56 (In Russ.).

18. Sizov A.S., Katykhin A.I., Makeev V.V. [Development of mathematical models of data representation in the information base of the gaming automated training complex. *Innovatsii v informatsionno-analiticheskikh sistemakh: sb. nauch. trudov*]. [Innovations in information and analytical systems: collection of scientific papers]. Kursk, 2011, is. 1, pp. 113 – 119.

19. Sizov A.S., Katykhin A.I., Teplova V.V., Makeev V.V. [Formalization of the process of evacuation of people from premises to create an automated learning game system].

*Sovremennye informatsionnye tekhnologii. Sb. statei po mater. mezh-dunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: collection of articles on mater. international scientific and technical conf.], May 25, 2011. Penza: Penzenskaya gos. tekhn. akademiya, 2011, pp. 77 – 81.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Халин Юрий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Yuri A. Khalin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Катыхин Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: katykhin.a@yandex.ru

**Alexander I. Katykhin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: katykhin.a@yandex.ru

**Зинкин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Sergey A. Zinkin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computer Engineering Department, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Шилин Александр Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Alexander A. Shilin**, , Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, Energy Engineering School, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

## Выбор протокола приема передачи данных и разработка алгоритма выбора процессорного модуля «мастера» для реконфигурируемой вычислительной сети реального времени

Д. А. Асеев<sup>1</sup>, Д. Б. Борзов<sup>1</sup>✉, В. С. Титов<sup>1</sup>, И. Е. Чернецкая<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: borzovdb@kursknet.ru

### Резюме

**Цель исследования:** Вычислительные сети из множества процессорных модулей существовали уже давно, однако с развитием беспроводных технологий появилась возможность качественной и недорогой реализации идеи реконфигурируемых вычислительных сетей реального времени (РВСПВ). Целью данной работы является выбор беспроводной сети передачи данных для РВСПВ и создание алгоритма динамического выбора процессорного модуля «мастера».

**Методы.** Методы исследования работы основаны на определениях теории множеств и графов. В частности, за основу взят графо-теоретический подход к распределению, дополненный введением системы критериев реконфигурируемой вычислительной системы реального времени на основе беспроводного протокола передачи данных.

**Результаты.** В данной работе выбран наиболее подходящий протокол передачи данных для локальной РВСПВ, представлена разработанная математическая модель изменения вычислительной системы реального времени, построенной на беспроводном протоколе и алгоритм выбора процессорного модуля (ПМ) «мастера» РВСПВ. Новизной работы является применение матрицы расстояния для математического описания изменения РВСПВ и ее использование для определения ПМ «мастера» в ВС.

**Заключение.** Разработанный алгоритм выбора ПМ «мастера» РВСПВ и математическая модель изменения положения ПМ в вычислительной системе реального времени, построенной на беспроводном протоколе, позволяет обеспечить организацию оптимального выбора ПМ «мастера» в реконфигурируемой вычислительной системе. На основании представленной математической модели в дальнейшем представляется возможным создание полноценной математической модели РВСПВ и алгоритма размещения задач в ней.

**Ключевые слова:** распределенные вычисления; вычислительные системы; беспроводное соединение; матрица расстояний; процессорный модуль.

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

**Для цитирования:** Выбор протокола приема передачи данных и разработка алгоритма выбора процессорного модуля «мастера» для реконфигурируемой вычислительной сети реального времени / Д. А. Асеев, Д. Б. Борзов, В. С. Титов, И. Е. Чернецкая // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 132-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-132-147>.

Поступила в редакцию 30.06.2022

Подписана в печать 24.08.2022

Опубликована 14.10.2022

## Selection of the Protocol for Receiving Data Transmission and Development of an Algorithm for Selecting The "Master" Processor Module for a Reconfigurable Real-Time Computer Network

Dmitriy A. Aseev <sup>1</sup>, Dmitry B. Borzov <sup>1</sup> ✉, Vitaly S. Titov <sup>1</sup>, Irina E. Chernetskaya <sup>1</sup>

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

✉ e-mail: borzovdb@kursknet.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Computing networks of a plurality of processor modules have existed for a long time, however, with the development of wireless technologies, the possibility of high-quality and inexpensive implementation of the idea of real-time reconfigurable computing networks (RRTCН) has emerged. The purpose of this work is to select a wireless data transmission network for the RRTCН and create an algorithm for the dynamic selection of the "master" processor module.

**Methods.** The research methods of the work are based on the definitions of the theory of sets and graphs. In particular, a grapho-theoretical approach to distribution is taken as a basis, supplemented by the introduction of a system of criteria for a reconfigurable real-time computing system based on a wireless data transmission protocol.

**Results.** In this paper, the most suitable data transfer protocol for the local RCSRВ is selected, a developed mathematical model of changing a real-time computing system built on a wireless protocol is presented, and an algorithm for selecting the processor module (PM) of the RCSRВ "master" is developed. The novelty of the work is the use of the distance matrix for the mathematical description of the change in the RRTCН and its use to determine the PM of the "master" in the aircraft.

**Conclusion.** The developed algorithm for choosing the PM of the "master" RRTCН and the mathematical model of changing the position of the PM in a real-time computer system built on a wireless protocol allows organizing the optimal choice of the PM of the "master" in a reconfigurable computing system. On the basis of the presented mathematical model, in the future, it is possible to create a full-fledged mathematical model of the RRTCН and an algorithm for placing tasks in it.

**Keywords:** distributed computing, computing systems, wireless connection, distance matrix, processor module.

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

**For citation.** Aseev D. A., Borzov D. B., Titov V. S., Chernetskaya I. E. Selection of the Protocol for Receiving Data Transmission and Development of an Algorithm for Selecting The "Master" Processor Module for a Reconfigurable Real-Time Computer Network. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 132-147 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-132-147>.

Received 30.06.2022

Accepted 24.08.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

### Введение

Создание реконфигурируемой вычислительной сети, которая могла бы

подстраиваться под разные типы решаемых задач является довольно перспективным способом повышения реальной

производительности вычислительных процессов. В работах многих ученых, занимавшихся данной темой, доказана эффективность данного метода повышения производительности вычислительной сети путём распределения задач между отдельными процессорными модулями (ПМ) [1]. Однако статичная, как правило, топология подобных систем накладывает ряд ограничений, а изменение топологии такой системы довольно трудоемкий и не быстрый процесс. В свою очередь статичность комплекса накладывает ограничения на круг решаемых им задач [2], то есть эффективно выполняются задачи только соответствующей структуры. А это снижает востребованность системы, делает ее узкоспециализированной.

За последние два десятилетия беспроводные системы обмена данными, благодаря увеличению скорости и стабильности успели уже вытеснить из жизни множество традиционных средств связи и передачи информации. Что, в свою очередь, способно дать новый толчок развитию реконфигурируемых вычислительных систем.

Современные технологии беспроводной передачи данных, такие как 5G и WIFI 6, достигли такой скорости передачи данных, которая превышает скорость в локальных сетях Ethernet, при этом не требуя прокладки сотен метров кабелей к стационарным компьютерам, удешевляя процесс построения сетей.

## Материалы и методы

Беспроводная сеть (БС) – сеть, основанная на беспроводном принципе, основой которого служит протокол [3, 4]. В нем описывается такая информация, как адресация, маршрутизация, топология и многое другое, что необходимо для развертывания сети. Благодаря тому, что системы с беспроводным соединением мобильны, а их пропускная способность не уступает некоторым проводным соединениям, они получили широкое распространение – нашли свое место как в повседневной жизни, так и в промышленности, и даже в военной технике [4]. По существующей динамике развития сетей видно, что в ближайшем будущем беспроводные сети вытеснят проводные [3, 4].

Далее будут рассмотрены протоколы беспроводной передачи данных для локальной вычислительной сети.

1. Bluetooth позиционировался для связи таких устройств, как цифровая и офисная техника, игровые устройства. На сегодняшний день данный протокол используется большей частью устройств.

Для функционирования Bluetooth разработчиками был выбран свободный от лицензирования частотный диапазон ISM 2,4-2,4835 ГГц. Данный протокол может работать в двух режимах: SCO (Synchronous Connection Oriented) – синхронный; ACL (Asynchronous Connectionless) – асинхронный. Первый режим устанавливает симметричное соединение «точка-точка» и применяется для передачи речи в системах hands-

free. В синхронном режиме скорость передачи составляет 64 Кбит/с [5]. Вторым режимом может работать как в симметричном, так и в асимметричном способе соединения «Точка – много точек». Для обмена данными используются пакеты информации определенного формата. Пакет данных начинается с 72-битного кода доступа, который необходим для осуществления синхронизации между устройствами. Заголовок пакета, идущий следом, состоит из 54 бит. Он хранит контрольную сумму блока и параметры, такие как повторная передача блока данных. Последней идет сама передаваемая информация, объем которой колеблется от 0 до 2745 бит [5]. Bluetooth использует метод расширения спектра со скачкообразной перестройкой частоты и двухуровневую частотную модуляцию с фильтром Гаусса. Скачки подразумевают то, что весь доступный диапазон частот разбит на несколько подканалов с шириной в 1 МГц. Канал – это псевдослучайная последовательность скачков по 23 или по 79 подканалам диапазона. Происходит это каждые 625 мкс. Переключения подканалов в приемнике и источнике происходит одновременно. Связать устройства по этому протоколу можно в пределах от 10 до 100 метров друг от друга, даже если устройства в разных помещениях. На 2019 г. последняя версия стандарта Bluetooth 5.0. Скорость передачи составляет до 100 Мб в секунду.

Новая версия протокола Bluetooth 5.1, отличительная особенность которой

формулируется как максимальная точность поиска. Таким образом разработчики раскрывают все новые возможности данной технологии, и тем самым поддерживают к ней интерес [6].

2. UWB – это стандарт широкополосной беспроводной связи, функционирующий на коротких расстояниях в диапазоне частот от 3,1 до 10,6 ГГц. [3]. Скорость передачи данных составляет до 480 Мбит/с. Основная идея данной технологии заключается в испускании последовательности сверхкоротких импульсов. Они распределены по широкому участку спектра. Длина таких сигналов менее 0,5 нс, а период колеблется от 10-1000 нс. Информация кодируется полярностью и взаимным расположением сигналов. В результате достигается высокая суммарная мощность и скорость передачи данных при низком энергопотреблении [8].

3. ZigBee рассчитан на сети малой мощности с ячеистой топологией. Он хорошо подходит для наблюдения. Сенсоры, соединенные ZigBee, мало потребляют, а потому способны работать необходимое время на автономных источниках питания [9]. Сеть, построенная на данном протоколе, содержит следующие три типа устройств: координатор; маршрутизатор; оконечное устройство. Координатор создает сеть, определяя для нее частоту канала и идентификатор – PAN ID. Для каждого сетевого узла он хранит информацию и может им управлять. Маршрутизатор строит пути передачи сообщений от

устройства к устройству. При необходимости координатор и маршрутизатор могут выполнять функции источника, приемника и ретранслятора сообщений.

Оконечное устройство является источником или приемником сообщений, т.к. не участвует в управлении сетью и ретрансляции сообщений [10]. Для передачи данных протокол использует радиоканал. Большинство ZigBee-оборудования работает на частоте 2,4 ГГц. Она обеспечивает наибольшую пропускную способность, которая достигает 250 Кбит/с. Дальность при этом невелика – в помещении 10-20 метров [3].

4. Insteon – протокол прост и надежен по ряду причин. Во-первых, для обмена данными он использует как беспроводную, так и проводную связь. Они дублируют друг друга и применяются одновременно. Проводная сеть – это электропроводка здания. Сигнал передается на частоте 131,65 КГц, поэтому не создает помех для устройств, находящихся в доме и так же использующих электросеть. Беспроводная сеть – радиоволны на частотах 869,85 и 915 МГц. Дальность действия в пределах 50 метров, скорость передачи данных 38 Кбит/с. [11]. Во-вторых, данный протокол поддерживает ячеистую топологию сети, не зависимо от того, какая среда передачи используется. Каждое устройство является и приемником, и передатчиком. Когда узел получает пакет данных, он тут же пересылает его всем остальным точкам в зоне досягаемости [11]. В-третьих, сеть строится без цен-

трального контролера. Он желателен, но не обязателен. В-четвертых, протокол не накладывает ограничения на количество устройств сети. Теоретически можно соединить до 16,7 миллиона точек.

5. Z-Wave – протокол для дистанционного управления устройствами домашних сетей. В России данный протокол работает на частоте 869.0 МГц. В зависимости от поколения скорость передачи может составлять 9.6 кбит/с, 42 кбит/с и 100 кбит/с. Сеть Z-Wave может включать в себя более 200 устройств, однако на практике установка более 30-ти не выгодна. Дальность действия антенны может составлять до 30 метров [3]. Каждое отдельное устройство в сети может использоваться в качестве передатчика, если устройство, на которое подается команда, не находится в зоне прямой досягаемости. Однако низкая скорость передачи данных не позволяет эффективно обмениваться какой-либо информацией, помимо простых команд.

6. ANT – разрабатывался для маломощных устройств с автономным питанием (устройства с малым током потребления). Пакеты, которые отправляют устройства по ANT, относительно короткие. Протокол обеспечивает связь двух устройств, одно из которых – сенсор, собирающий и передающий данные, второе – данные принимает. Связь может образовываться и между задействованными устройствами. Например, устройство, которое передает данные, может принимать их от другого [3].

Данный протокол применяется для соединения различных датчиков. Максимальная скорость обмена данными составляет 1 Мбит/с [3].

7. RuBEE – протокол двухсторонней беспроводной связи в местной региональной сети с использованием длинноволнового диапазона (LW) и пакетов данных не более 128 байт [3]. RuBee работает как трансивер, похожий на двухстороннюю рацию, но использует магнитные волны, а не радиоволны. В кодах RuBee есть возможность отслеживать время. В их наличии есть батарея и статическая память. Кроме того, метки RuBee могут быть оснащены датчиками, проводить учет и хранить их информацию. RuBee networked работает в режиме точка-точка. Если узлы сети ориентированы на малое потребление энергии, то необходимым условием является применение Стандарта IEEE P1902.1, который описывает работу на низкочастотной несущей (131 кГц) [13].

8. RFID (англ. Radio Frequency Identification, радиочастотная идентификация) – технология, позволяющая бесконтактно обмениваться информацией, используя радиочастотное излучение. Данные считываются или записываются на транспондеры или RFID-метки. Метки RFID представляют собой небольшие запоминающие устройства. В это хранилище записывается уникальный номер и хранится необходимая информация до тех пор, пока она не попадет в определенную зону, формируемую считывателем RFID. Он получает

информацию. Считыватель передает энергию пассивной метке. Когда необходимое ее количество будет накоплено, начнется отправка данных. Эта технология работает на расстоянии от нескольких миллиметров до сотен метров, в зависимости от типа считывателя и архитектуры метки.

9. Стандарт X10 определяет методы и протоколы передачи управляющих сигналов для электронных модулей, к которым подключена бытовая техника с использованием традиционной электропроводки или беспроводных каналов [3, 15]. Каждое устройство сети снабжено адресом, состоящим из двух символов. Он, как и команды кодируется и передается в двоичном виде. Для передачи пакетов используется частота 120 кГц. Сигнал длится 1 мс. Данные передаются, когда напряжение достигает нулевой отметки. Начало передачи отмечается стартовым кодом – 1110, далее следует адрес и команда. Приемник слушает сеть в течение 6 мс. Если сигнал был, то устройство воспримет его как двоичную единицу. Отсутствие данных – это двоичный ноль.

10. Wi-Fi – это технология для организации локальных беспроводных сетей на базе стандарта IEEE 802.11. Скорость передачи данных зависит от протокола:

- 802.11b – до 11 Мбит/с;
- 802.11g – до 54 Мбит/с;
- 802.11n – до 300 Мбит/с;
- 802.11ac – до 3.39 Гбит/с;
- 802.11ax – до 11 Гбит/с.

Радиус действия Wi-Fi сети – до 100 метров [16].

Принцип работы данной технологии основан на передаче зашифрованных сигналов с помощью сверхвысоко-частотных волн на небольшие (десятки метров) расстояния. Стандартная схема сети Wi-Fi включает как минимум одну точку доступа (так называемый инфраструктурный режим) и как минимум одного клиента. В этом случае точка доступа преобразует информацию в радиоволны и распространяет их с помощью антенны. Получатель-клиент получает информацию и выполняет обратное преобразование. Также, если точка доступа не используется и клиент подключен «напрямую» через сетевой адаптер, сеть может работать в режиме «точка-точка». Точка доступа отправляет идентификатор сети (SSID) с помощью специального служебного пакета со скоростью 0,1 Мбит/с каждые 100 миллисекунд. Поэтому минимальная скорость передачи данных для Wi-Fi составляет 0,1 Мбит/с. Поскольку клиент знает SSID сети, он видит, сможет ли он подключиться к этой точке доступа через специальный пакет [18].

Как только две точки доступа с одинаковым SSID находятся в пределах досягаемости, приемник может выбрать одну из них на основе информации об уровне сигнала.

Wi-Fi был выбран в качестве беспроводного протокола из-за его оптимальных свойств: 1) рабочая скорость передачи данных  $S_{раб} = 1200-1400$

Мб/с, максимальная скорость передачи данных  $S_{мах} = 5$  Гб/с ; 2) позволяет создавать эффективную корпоративную сеть, что позволит реализовать полностью связанное соединение.

РВСРВ – это множество процессорных модулей, связанных между собой беспроводным протоколом. Подобную систему наиболее полно можно описать неориентированным графом, для непосредственной связи узлов друг с другом используют полносвязные топологии, представленные на рис. 1, известной также под названием топологии «максимальной группировки» или «топологии клика» каждый узел напрямую соединен со всеми остальными узлами сети.

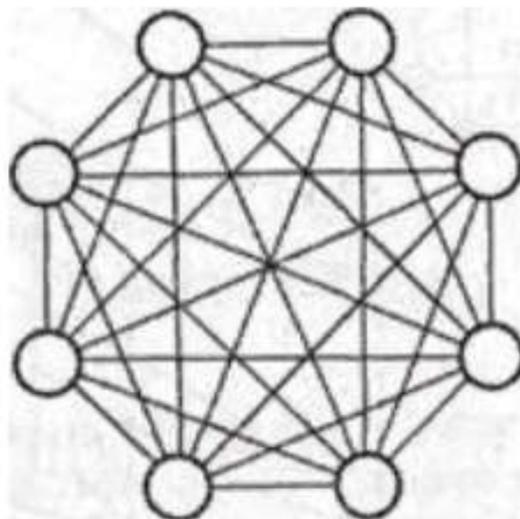


Рис. 1. Полносвязное соединение

Fig. 1. Full connection

Эта топология самая быстрая, так как обмен информацией между узлами идет напрямую. Данные системы надежны – при выходе из строя одного из узлов, система продолжит работу без существенных изменений. Но большие ( $N > 20$ ) системы на такой топологии

строить не стоит из-за квадратичного роста числа связей с низкой загрузкой. Это экономически не выгодно. Кроме того, каждая операция передачи требует, чтобы узел проверял состояние всех входов N-1, поэтому в топологиях с максимальной группировкой нет значительного повышения производительности. Для ускорения этой операции все входные данные следует анализировать параллельно. Это усложняет конструкцию узла. Однако данная топология наиболее хорошо описывает РВСРВ, где количество ПМ может меняться.

В связи с тем, что в динамической ВС на беспроводном протоколе из-за возможности перемещения ПМ относительно друг друга одним из важнейших показателей, необходимых для распределения задач между модулями, будет являться скорость обмена данными между отдельными ПМ [19].

Для примера возьмём модель из 5 ПМ, выраженную неориентированным графом, где вершины – это номера ПМ, а рёбра связи между ПМ со значениями уровня сигнала WI-FI от 1 до 4 (рис. 2).

Построение реконфигурируемой вычислительной системы реального времени подразумевает выполнение определенных действий, которые направлены на составление матрицы расстояний  $MP_{N \times N}$  и выбор «мастера» сети [7]. При этом матрица содержит информацию о расстоянии между процессорными модулями, которые в на-стоящий момент

находятся в системе, а «мастер» обеспечивает их взаимодействие (обмен данными, контроль маршрутизации и т.д.).

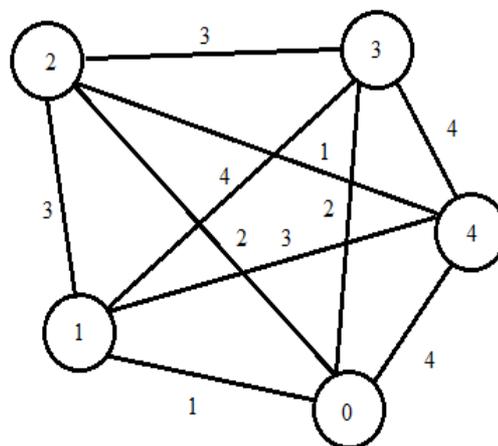


Рис. 2. Граф вычислительной системы

Fig. 2. Computing system graph

Для получения матрицы расстояний целесообразно рассчитать коэффициент расстояния (КР), так как уровни сигнала не могут точно отражать скорость обмена данными между ПМ. Воспользуемся таблицей MCS стандарта Wi-Fi и на основе показателя силы сигнала RSSI и используемого частотного канала [20].

$$КР = -F * RSSI, \quad (1)$$

где F – номер канала; RSSI – значение силы сигнала.

В результате расчётов получились коэффициенты КР, представленные в табл. 2.

В итоге граф вычислительной системы приобретает следующий вид, представленный на рис. 3.

Таблица 1. Индексы MCS

Table 1. MCS indices

MCS	4		3		2		1	
	20 MHz		40 MHz		80 MHz		160 MHz	
	Ско- рость, Мб/с Speed Mb/s	RSSI, д Б						
0	13	-82	27	-79	58.5	-76	117	-73
1	26	-79	54	-76	117	-73	234	-70
2	39	-77	81	-74	175.5	-71	351	-68
3	52	-74	108	-71	234	-68	468	-65
4	78	-70	162	-67	351	-64	702	-61
5	104	-66	216	-63	468	-60	936	-57
6	117	-65	243	-62	526.5	-59	1053	-56
7	130	-64	270	-61	585	-58	1170	-55
8	156	-59	324	-56	702	-53	1404	-50
9			360	-54	780	-51	1560	-48

Таблица 2. Коэффициенты расстояния

Table 2. Distance coefficients

MCS	F			
	4	3	2	1
0	328	237	152	73
1	316	228	146	70
2	308	222	142	68
3	296	213	136	65
4	280	201	128	61
5	264	189	120	57
6	260	186	118	56
7	256	183	116	55
8	236	168	106	50
9		162	102	48

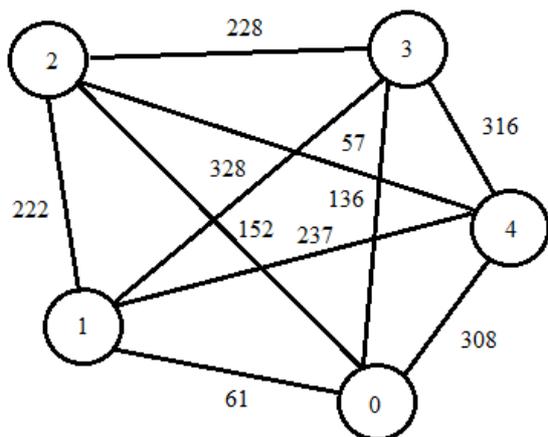


Рис. 3. Граф РВСРВ с коэффициентами расстояния

Fig. 3. RRTCН Graph with Distance Coefficients

По полученным данным построим матрицу расстояний  $MP (A_{5 \times 5})$ , элементы которой являются значениями множества рёбер  $R \{61, 222, 228, 316, 308, 152, 57, 237, 328, 136\}$ , соединяющих вершины  $V \{0, 1, 2, 3, 4\}$ .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 61 & 152 & 136 & 308 \\ 61 & 0 & 222 & 328 & 237 \\ 152 & 222 & 0 & 228 & 57 \\ 136 & 328 & 228 & 0 & 316 \\ 308 & 237 & 57 & 316 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Мастер выбирается из условий:

1)  $r = \min \{ \sum_{i,j=0}^N r_{i,j} \}$ , где  $N$  – количество ПМ,  $r_{ij}$  – значения МР;

2)  $r_n = count(r_{max})$ , где  $r_{max}$  – максимум по строке. При выполнении условия  $r_M < r_n$ ;

3)  $G_M > G_{PM}$ , где  $G_M$  – коэффициент усиления антенны мастера,  $G_{PM}$  – коэффициент усиления антенны процессорного модуля, претендующего на роль мастера. Условие 1 является необходимым и достаточным, 2 и 3 условия используются как дополнительные, когда первое условие не выявило мастера.

Алгоритм выбора мастера из набора устройств составлен по заданным условиям и представлен на рис. 4.

Алгоритм, представленный на рисунке 4 состоит из нескольких шагов:

1. По каждой строке матрицы расстояний (МР) считается сумма. Высчитывается максимум во всей МР.

2. Из полученных сумм выбирается минимальная. Если минимальных сумм несколько, то есть несколько претендентов на роль мастера, тогда проверяется следующее условие.

3. Из тех устройств, у кого сумма по строке в МР минимальна, считается количество максимумов, которые найдены на первом шаге. Сравнивается этот показатель. У кого максимумов меньше, тот становится мастером. Если же и это не выявило мастера, выполняется 4 шаг.

4. Для тех устройств, у которых минимум максимумов в строке, сравнивается коэффициент усиления антенны. Устройство с самым большим коэффициентом становится мастером.

Для составления матрицы расстояний необходимо знать уровень сигнала. Этот показатель, наравне с физическим расстоянием, влияет на скорость передачи данных, а вычисляется он при подключении устройства к точке доступа. В свою очередь расчет расстояния между устройствами – процесс трудоемкий, и дает не точный результат (десятки метров). Поэтому в МР будет записываться КР, как было написано выше, а не физическое расстояние.

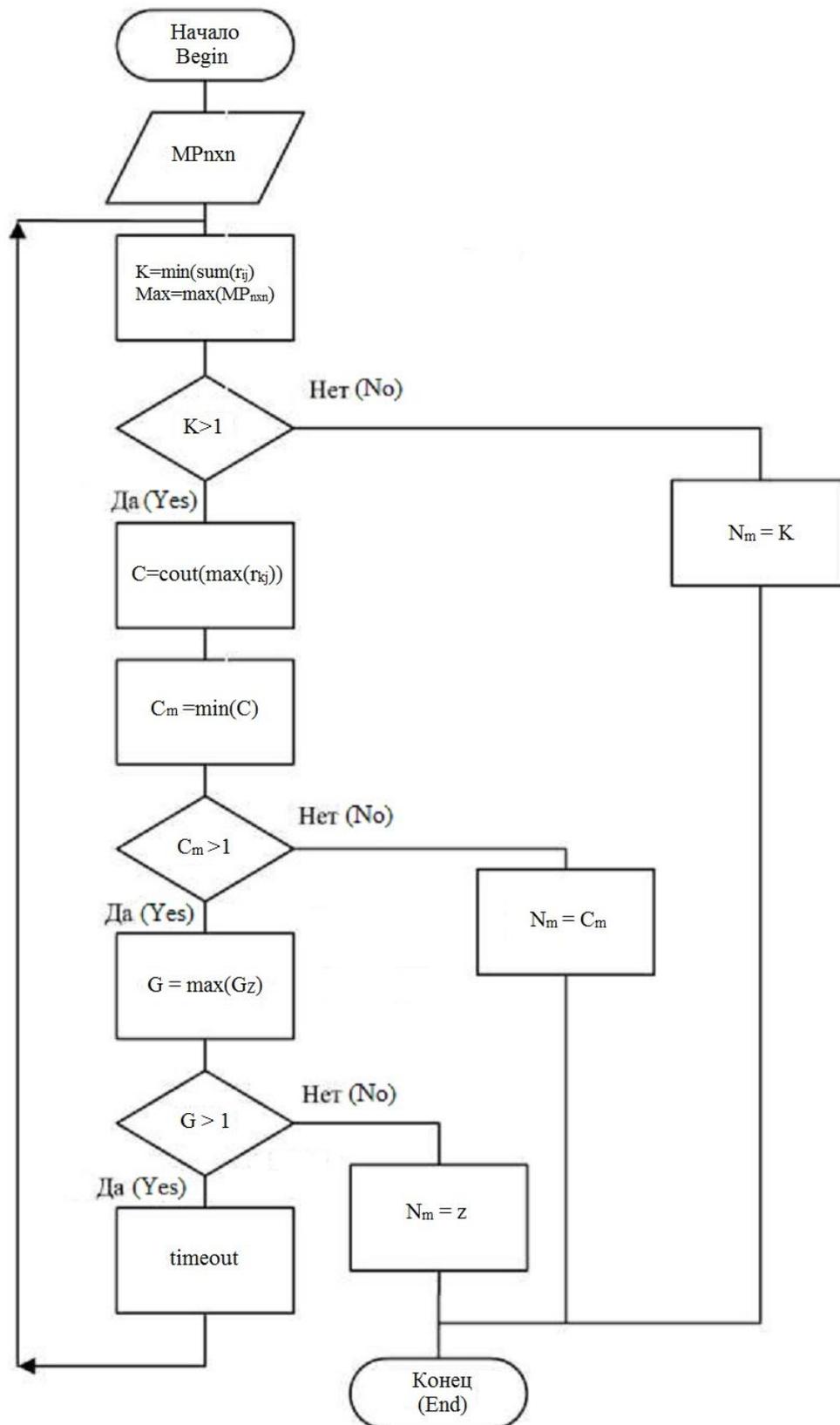


Рис. 4. Алгоритм выбора «мастера»

Fig. 4. "Master" Selection Algorithm

### Результаты и их обсуждение

Таким образом, методика построения реконфигурируемой вычислительной системы реального времени состоит из следующих шагов: 1. За время ожидания в системе фиксируется количество активных устройств. 2. Составляется матрица расстояний из КР. 3. Выбирается мастер. Следует отметить, что процессорные модули работают в режиме точки доступа. Каждый ПМ при

активном wi-fi начинает строить РВСРВ. На первом шаге каждому устройству, подключающемуся к системе, присваивается идентификатор, уникальный в пределах настоящей системы. На протяжении времени ожидания процессорные модули обмениваются служебными пакетами (рис.5), содержащими идентификаторы ПМ, коэффициент усиления антенны и массив информации.

Идентификатор пакета	Идентификатор устройства	G	Массив информации
----------------------	--------------------------	---	-------------------

Рис. 5. Служебный пакет обмена

Fig. 5. Service exchange package

Идентификатор пакета – принимает значение *exchang*, идентификатор устройства – номер устройства, присвоенный при появлении ПМ в системе. Массив информации имеет вид:

$$\text{dev}[N]=\{\{id_i;sig_i \dots id_n;sig_n\}\}, \quad (3)$$

где *id* – идентификатор процессорного модуля; *sig* – коэффициент расстояния; *G* – коэффициент усиления антенны.

<i>exchang</i>	1	{1;308}, {2;256}, {4;48}	1,5
----------------	---	--------------------------	-----

Например:

На шаге 2 после обмена пакетами у каждого ПМ сформируется матрица расстояний. Например:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 308 & 183 & 128 \\ 308 & 0 & 183 & 48 \\ 183 & 256 & 0 & 256 \\ 128 & 48 & 142 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Кроме того, составится табл. 3:

Таблица 3. Коэффициент усиления антенн

Table. 3. Antenna gain

id	G
0	1
1	2
2	1.5
3	3

Первый столбец в табл. 3 – идентификатор устройства – *id*, второй столбец коэффициент усиления антенны – *G*.

На шаге три считается сумма элементов каждой строки матрицы *A*. По матрице из формулы (4) получаются следующие данные:

$$r_{\text{sum}_0} = 491, r_{\text{sum}_1} = 612, \\ r_{\text{sum}_2} = 581, r_{\text{sum}_3} = 318.$$

По условию 1 мастером становится 3-процессорный модуль.

Параллельно расчетам ПМ, по мере того, как система продолжает обмени-

ваться пакетами, данные матрицы расстояний обновляются и сравниваются с текущими данными. Если мастер меняется, то текущий мастер завершает начатую операцию, отправляет задание источнику, если успел его запросить, и пока новый мастер уже выполняет свою функцию, он будет продолжать функционировать как обычный процессорный модуль.

### Выводы

В ходе работы был выбран протокол беспроводной связи для РВСРВ, а также предложен алгоритм выбора ПМ

мастера для РВСРВ на полносвязной топологии, проиллюстрирован пример работы алгоритма на основе случайных данных об уровне сигнала wi-fi для системы из пяти ПМ.

Новизной работы является применение матрицы расстояния для математического описания изменения РВСРВ и ее использование для определения ПМ мастера в ВС.

В дальнейшем на основе материалов работы представляется возможным создание полноценной математической модели РВСРВ и алгоритма размещения задач в ней.

### Список литературы

1. Плещинский Н.Б., Плещинский И.Н. Многопроцессорные вычислительные комплексы. Технологии параллельного программирования. Казань: Изд-во КФУ, 2018.
2. Мелехин В.Ф. Вычислительные машины, системы и сети. М.: Изд-во «Academia», 2017.
3. Колыбельников А. И. Обзор технологий беспроводных сетей // Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 2: 3-29.
4. Закалюжный А.А. Развитие беспроводных сетей как средство контроля и управления удаленными системами // Молодой исследователь Дона. 2018; №4: 46–51.
5. Скачков М. К. Что такое Bluetooth и как он работает? // Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи. 2022. URL: <http://1234g.ru/blog-of-wireless-technologies/about-bluetooth/что-такое-bluetooth-i-kak-on-rabotaet>.
6. Bluetooth (IEEE 802.15.1). [<https://www.kipis.ru/>] // Контрольно-измерительные приборы и системы; 2018. URL: [https://www.kipis.ru/info/index.php?ELEMENT\\_ID=46384](https://www.kipis.ru/info/index.php?ELEMENT_ID=46384).
7. Методика и алгоритм построения вычислительной сети на основе беспроводного протокола / Д. Б. Борзов, А. А. Чернышев, А. С. Сизов, Ю. В. Соколова // Труды МАИ. 2021; № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162667>.
8. Haraz O. Ultra-Wideband Antennas and Components. Assuit: Assuit University; 2013.
9. Khursheed A.R., Manish K. A Review on ZigBee Based Remote Sensing and Controlling System // International Research Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 03. Is. 06.

10. Sridevi D., Kumaravel A., Gunasekaran S. A ZigBee Based Security System for Supporting Children with Autism // IRE Journals. 2019. Vol. 2. Is. 11.
11. Жогов Н. Insteon: «умный» дом своими руками // Электронные данные; 2014. URL: <http://www.ferra.ru/review/smarthome/SmartHome-Insteon.htm>.
12. Гришанков В. Технология ANT – что это такое в телефоне? // AndroidLime. 2019. URL: <https://androidlime.ru/ant-technology-what-is-it-on-the-phone>.
13. Real-Time Wireless Armory Automation and Security Armory. 2018. URL: <https://www.ru-bee.com/Arms/index.html>.
14. RFID-технология. Все о радиочастотной идентификации // PCT-inventory. 2020. URL: <http://www.rst-invent.ru/about/technology>.
15. Что такое ZigBee, Z-Wave и Insteon? Стандарты домашней автоматизации // . Конференции Интернет Вещей. 2015. URL: <https://iotconf.ru/ru/article/chto-takoe-zigbee-z-wave-i-insteonstandartidomashney-avtomatizatsii>.
16. Технологии и стандарты Wi-Fi. Скорость интернета в Wi-Fi сети // Livebusiness. 2019. URL: <http://wimax.livebusiness.ru/tags/WI-FI/>.
17. Топологии сетей WiFi // Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи. 2019. URL: <http://1234g.ru/wifi/topologii-setej-wifi>.
18. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2020.
19. Липницкий В. А., Сергей А. И., Спичекова Н. В. Научнотехнические задачи, связанные с бинарными матрицами // Цифровая обработка сигналов и теория кодирования: материалы научно-технического семинара. Минск, 2018. С. 43-47.
20. Coleman D.D., Westcott D.A. CWNA Certified Wireless Network Administrator Study Guide: Exam CWNA-107, 5th Edition. Durham: Sybex. 2018.

## References

1. Pleshchinskij N.B., Pleshchinskij I.N. *Mnogoprocessornye vychislitel'nye komplekсы. Tekhnologii parallel'nogo programmirovaniya* [Multiprocessor computing systems. Technologies of parallel programming.]. Kazan', 2018.
2. Melekhin V.F. *Vychislitel'nye mashiny, sistemy i seti* [Computers, systems and networks]. Moscow, Academia Publ., 2017.
3. Kolybelnikov A.I. Obzor tekhnologij besprovodnyh setej [Review of technologies of wireless networks]. *Trudy MFTI = Proceedings of MIPT*. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 3-29.
4. Zakalyuzhny A.A. Razvitie besprovodnyh setej kak sredstvo kontrolya i upravleniya udalennymi sistemami [Development of wireless networks as a means of control and management of remote systems]. *Molodoj issledovatel' Dona = Young Researcher of Don*, 2018, no.4, pp. 46–51.

5. Skachkov M.K. Что такое Bluetooth i kak on rabotaet? [What is Bluetooth and how does it work?] *Portal o sovremennyh tekhnologiyah mobil'noj i besprovodnoj svyazi [Portal about modern technologies of mobile and wireless communications]*. Available: <http://1234g.ru/blog-of-wireless-technologies/about-bluetooth/chto-takoe-bluetooth-i-kak-on-rabotaet>.

6. Bluetooth (IEEE 802.15.1). *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy [Test & Measuring Instruments and Systems]*. Available: [https://www.kipis.ru/info/index.php?ELEMENT\\_ID=46384](https://www.kipis.ru/info/index.php?ELEMENT_ID=46384). (in Russ)

7. Borzov D. B., Chernyshev A. A., Sizov A. S., Sokolova Yu. V. Methodology and algorithm for building a computer network based on a wireless protocol. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2021, no. 121. Available: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162667>.

8. Haraz O. Ultra-Wideband Antennas and Components. Assuit: Assuit University; 2013.

9. Khursheed A.R., Manish K. A Review on ZigBee Based Remote Sensing and Controlling System. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016, vol. 03, is. 06.

10. Sridevi D., Kumaravel A., Gunasekaran S. A ZigBee Based Security System for Supporting Children with Autism. *IRE Journals*, 2019, vol. 2, is. 11.

11. Zhogov N. Insteon: «umnyj» dom svoimi rukami [Insteon: "smart" home with your own hands]. *Elektronnyye dannye [Electronic data]*. Available: <http://www.ferra.ru/review/smarthome/SmartHome-Insteon.htm>.

12. Grishankov V. Tekhnologiya ANT – chto eto takoe v telefone? [ANT technology - what is it in the phone?] *AndroidLime*. 2019. Available: <https://androidlime.ru/ant-technology-what-is-it-on-the-phone>.

13. Real-Time Wireless Armory Automation and Security. *Armory*. 2018. Available: <https://www.ru-bee.com/Arms/index.html>.

14. RFID-tekhnologiya. Vse o radiochastotnoj identifikacii [RFID technology. All about RFID]. *PCT-inventory*. 2020. Available: <http://www.rst-invent.ru/about/technology>.

15. Что такое ZigBee, Z-Wave i Insteon? Standarty domashnej avtomatizacii [What are ZigBee, Z-Wave and Insteon? Home automation standards]. *Konferencii Internet Veshchej [Internet of Things conferences]*. 2015. Available: <https://iotconf.ru/ru/article/chto-takoe-zigbee-z-wave-i-insteonstandartidomashney-avtomatizatsii>.

16. Tekhnologii i standarty Wi-Fi. Skorost' interneta v Wi-Fi seti [Technologies and standards of Wi-Fi. Internet speed in Wi-Fi network]. *Livebusiness*. 2019. Available: <http://wimax.livebusiness.ru/tags/WI-FI/>.

17. Topologii setej WiFi [Topology of WiFi networks]. *Portal o sovremennyh tekhnologiyah mobil'noj i besprovodnoj svyazi* [Portal about modern technologies of mobile and wireless communications]. 2019. Available: <http://1234g.ru/wifi/topologii-setej-wifi>.

18. Olifer V., Olifer N. *Komp'yuternye seti. Principy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. St. Petersburg, Piter Publ., 2020.

19. Lipnitskiy V.A., Sergey A.I., Spichekova N.V. [Scientific and technical problems associated with binary matrices]. *Cifrovaya obrabotka signalov i teoriya kodirovaniya: materialy nauchno-tekhnicheskogo seminara* [Digital signal processing and coding theory: materials of a scientific and technical seminar]. Minsk, 2018. С. 43–47 (In Russ).

20. Coleman D.D., Westcott D.A. CWNA Certified Wireless Network Administrator Study Guide: Exam CWNA-107, 5th Edition. Durham: Sybex; 2018.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Асеев Дмитрий Альбертович**, аспирант кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [dmaseev@rambler.ru](mailto:dmaseev@rambler.ru)

**Dmitriy A. Aseev**, Post-Graduate Student of the Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [dmaseev@rambler.ru](mailto:dmaseev@rambler.ru)

**Борзов Дмитрий Борисович**, доктор технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [borzovdb@kursknet.ru](mailto:borzovdb@kursknet.ru)

**Dmitry B. Borzov**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [borzovdb@kursknet.ru](mailto:borzovdb@kursknet.ru)

**Титов Виталий Семенович**, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [vt.swsu@yandex.ru](mailto:vt.swsu@yandex.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0241-582X>

**Vitaly S. Titov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [vt.swsu@yandex.ru](mailto:vt.swsu@yandex.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0241-582X>

**Чернецкая Ирина Евгеньевна**, доктор технических наук, доцент, завкафедрой вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [white731@yandex.ru](mailto:white731@yandex.ru)

**Irina E. Chernetskaya**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Computer Science Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [white731@yandex.ru](mailto:white731@yandex.ru)

## Метод оценки и прогнозирования экономических рисков предприятия на основе интеллектуального анализа данных

Ю.А. Халин <sup>1</sup>✉, Ю.А. Криушина <sup>1</sup>, С.А. Зинкин <sup>2</sup>, А.А. Шилин <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет  
ул. Красная д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
пр. Ленина д. 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: [yur-khalin@yandex.ru](mailto:yur-khalin@yandex.ru)

### Резюме

**Цель исследования.** Главной целью данной работы является повышение качества и оперативности принятия управленческих решений на основе разработки метода оценки и прогнозирования экономических рисков предприятия. Данный метод основан на технологии интеллектуального анализа данных (Data Mining).

**Методы.** В работе использованы методы обработки и анализа панельных данных, для которых строилась математическая модель прогнозирования уровня конкурентоспособности предприятия, а также модель прогнозирования экономических рисков предприятия на основе объединения нескольких методов интеллектуального анализа данных: кластеризации слияния панельных данных оценки экономических рисков предприятия и метод слияния нечеткой корреляции для статистического анализа панельных данных.

**Результаты.** В результате применения разработанного метода были получены количественные оценки уровня конкурентоспособности и экономических рисков предприятия. На основе полученных количественных оценок уровня конкурентоспособности и уровня экономического риска, был проведён кластерный анализ предприятий некоторой отрасли. Разработанные методы обладают высокой точностью прогнозирования экономических рисков предприятий, улучшают возможности интеллектуального анализа данных и объединения информации об экономических рисках предприятий, что повышает конкурентоспособность предприятий.

**Заключение.** Разработан метод прогнозирования экономических рисков предприятия, основанный на технологии интеллектуального анализа данных. Получены взвешенные оценки пространственных признаков панельных данных, позволяющие получить интегральные оценки экономических рисков предприятия и уровень конкурентоспособности предприятия. Предложена модель анализа нечетких правил семантических признаков панельного интеллектуального анализа данных оценки экономических рисков предприятия. Анализ показывает, что разработанный метод имеет высокую точность и лучшую защиту от помех при прогнозировании данных.

**Ключевые слова:** панельные данные; интеллектуальный анализ данных; экономические риски; прогнозирование; нечёткие данные; предприятие; конкурентоспособность; прогнозирование; система управления предприятием.

© Халин Ю.А., Криушина Ю.А., Зинкин С.А., Шилин А.А., 2022

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

**Для цитирования:** Метод оценки и прогнозирования экономических рисков предприятия на основе интеллектуального анализа данных / Ю.А. Халин, Ю.А. Криушина, С.А. Зинкин, А.А. Шилин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 148-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-148-161>.

Поступила в редакцию 26.08.2022

Подписана в печать 06.09.2022

Опубликована 14.10.2022

## Method for Assessing and Forecasting Economic Risks of an Enterprise Based on Data Mining

Yuri A. Khalin <sup>1</sup> ✉, Yulia A. Kriushina <sup>1</sup>, Sergey A. Zinkin <sup>2</sup>, Alexander A. Shilin <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Penza State University  
40, Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Ave Lenin, Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The main purpose of this work is to improve the quality and efficiency of managerial decision-making based on the development of a method for assessing and forecasting economic risks of an enterprise. This method is based on data mining technology.

**Methods.** The paper uses methods of panel data processing and analysis, for which a mathematical model for predicting the level of competitiveness of an enterprise was built, as well as a model for predicting economic risks of an enterprise based on combining several methods of data mining: clustering of merging panel data for assessing economic risks of an enterprise and the method of merging fuzzy correlation for statistical analysis of panel data.

**Results.** As a result of the application of the developed method, quantitative assessments of the level of competitiveness and economic risks of the enterprise were obtained. Based on the obtained quantitative assessments of the level of competitiveness and the level of economic risk, a cluster analysis of enterprises in some industry was carried out. The developed methods have high accuracy in predicting economic risks of enterprises, improve the capabilities of data mining and combining information about economic risks of enterprises, which increases the competitiveness of enterprises.

**Conclusion.** A method of forecasting economic risks of an enterprise based on data mining technology has been developed. Weighted estimates of spatial features of panel data were obtained, which allow to obtain integral estimates of the economic risks of the enterprise and the level of competitiveness of the enterprise. A model for the analysis of fuzzy rules of semantic features of panel intelligent data analysis of the assessment of economic risks of the enterprise is proposed. The analysis shows that the developed method has high accuracy and better protection against interference when predicting data.

**Keywords:** panel data; intelligent data; economic risks; forecasting; fuzzy data; enterprise; competitiveness; forecasting; enterprise management system.

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

**For citation.** Khalin Yu.A., Kriushina Yu.A., Zinkin S.A., Shilin A.A. Method for Assessing and Forecasting Economic Risks of an Enterprise Based on Data Mining. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 148-161 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-148-161>.

Received 26.08.2022

Accepted 06.09.2022

Published 14.10.2022

\*\*\*

## Введение

В связи с тем, что уровень конкуренции предприятий на международном рынке становится все выше и выше, им надо соответствовать внутреннему современному режиму управления и способности противостоять рискам. Необходимо изучить модель количественной оценки экономического риска предприятия в сочетании с методами интеллектуального анализа больших данных для прогнозирования и оценки. Благодаря эффективному прогнозированию экономических рисков предприятия система управления предприятиями должна быть изменена и модернизирована для постоянного совершенствования режима управления и повышения уровня управления [1, 2, 3, 4]. Затем строится более подходящий современный режим управления. Для развития предприятий необходимо оптимизировать контроль и прогнозирование экономических рисков [5, 6, 7]. Большое значение имеет изучение модели прогнозирования экономических рисков предприятий.

При разработке модели прогнозирования экономического риска предприятия необходимо оптимизировать прогнозирование данных экономического риска предприятия, построить оптимизированную модель прогнозирования панельных данных оценки эконо-

мического риска предприятия и объединить метод нечеткого корреляционного анализа для оптимизации прогнозирования и интеллектуального анализа информации об экономическом риске предприятия, с тем чтобы улучшить аналитическую способность интеллектуального анализа больших данных об экономическом риске предприятия. Представляет интерес исследование методов прогнозирования больших данных, связанных с экономическими рисками предприятий. На оптимизированную модель прогнозирования панельных данных оценки экономических рисков предприятия, изученную в этой статье, в процессе прогнозирования экономических рисков предприятия влияют повторяющиеся данные и данные о факторах помех в среде экономического развития предприятия, что приводит к низкой точности прогнозирования и плохой помехозащищенности данных. В данной статье предлагается метод прогнозирования экономических рисков предприятия, основанный на объединении больших данных, который в первую очередь анализирует статистические характеристики структуры данных. Затем проводится анализ характеристик и обработка кластеризации слияния панельных данных оценки экономических рисков предприятия. В сочетании с результатами извлечения рекурсивной эн-

тропийной характеристики панельных данных оценки экономического риска предприятия выполняется оптимизационное прогнозирование панельных данных оценки экономического риска предприятия [4, 7]. Наконец, проводится анализ имитационного теста и делается вывод о достоверности.

Для реализации прогнозирования экономического риска предприятия проводится статистический анализ панельных данных оценки экономического риска предприятия путем объединения метода кластеризации нечетких признаков [8, 9, 10]. Для реализации возможности доступа к базе данных системы обработки информации группы по оценке экономических рисков предприятия и планирования необходимо построить модель статистической структуры данных группы по оценке экономических рисков предприятия, и кластеризация информации осуществляется в соответствии со статистическими особенностями базы данных группы по оценке экономических рисков предприятия. Создана модель соответствия распределенной структуры данных панели оценки экономических рисков предприятия, создана модель соответствия статистического пространства данных панели оценки экономических рисков предприятия путем применения метода сопоставления блочных признаков, и прогнозирование оптимизации данных выполняется путем объединения метода индекса указателя координат, чтобы

получить статистическую структуру данных.

### Материалы и методы

В соответствии со статистическим распределением панельных данных оценки экономического риска предприятия выполняется нечеткая информационная кластеризация данных, устанавливается последовательность символьного распределения панельных данных оценки экономического риска предприятия, и применяется метод иерархического слияния для проведения адаптивного взвешивания обучение в процессе прогнозирования данных оценки прогнозирования экономических рисков предприятия [11, 12]. Формула адаптивного взвешенного обучения для прогнозирования экономических рисков предприятия выглядит следующим образом:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i^K}}{\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i^K}},$$

где  $z_0$  – значение оценки корреляции панельных данных оценки экономического риска предприятия;

$z_i$  – измеренное значение панельных данных оценки экономического риска предприятия, собранных в  $i$  точке;

$d_i$  – представляет расстояние между точкой прогнозирования данных и точкой 0;

$S$  – измеренное значение статистической характеристики данных панели оценки экономического риска предприятия;

$K$  – вес соответствия блочной функции.

В соответствии с адаптивным взвешенным методом обучения выполняется взвешивание пространственных характеристик панельных данных оценки экономических рисков предприятия, применяется метод кластеризации нечетких С-средних для объединения и кластеризации панельных данных оценки экономических рисков предприятия, извлекаются правила ассоциации панельных данных оценки экономических рисков предприятия, панельные данные оценки экономических рисков предприятия фокусируются в пространстве признаков с помощью метода многомерной пространственной реорганизации и временных рядов распределения  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  и  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$  [13, 12]. Модель пространственной кластеризации панельных данных оценки экономических рисков предприятия определяется следующим образом:

$$\begin{cases} x' = -\sigma x + \sigma y \\ y' = -xz + gx - y \\ z' = xy - bz. \end{cases}$$

Коэффициент характеристики нечеткой кластеризации панельных данных оценки экономических рисков предприятия рассчитывается и определяется как:

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}.$$

Методом нечеткой оптимизации проводится статистический анализ данных прогнозирования и оценки экономического риска предприятия, анализируется количество разностных характеристик данных прогнозирования и оцен-

ки экономического риска предприятия и выполняется нечеткое сопоставление данных, что позволяет получить определение набора правил ассоциации следующим образом:

$$d_{m+1}(m) = d_{k+1}(m) \pm \sqrt{(d_m(0)e^{\lambda+1})^2 - \sum_{i=1}^{m-1} [d_{m+1}(i) - d_{k+1}(i)]^2},$$

где  $d_{m+1}(m)$  – прогнозируемое значение набора данных панели оценки экономических рисков предприятия в первой точке;

$d_{k+1}(m)$  – нечеткая характеристика количества данных панели оценки экономических рисков предприятия, собранных в точке  $m$ .

В соответствии с приведенным выше анализом статистическая структура данных оптимизирована и реорганизована.

Путем анализа атрибутивных характеристик статистических данных группы по оценке экономических рисков предприятия и реализации статистического прогнозирования набора данных группы по оценке экономических рисков предприятия формула расчета для установления матрицы распределения правил ассоциации данных группы по оценке экономических рисков предприятия определяется как:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}, d_{12}, d_{13} \dots d_{1N} \\ d_{21}, d_{22}, d_{23} \dots d_{2N} \\ d_{31}, d_{32}, d_{33} \dots d_{3N} \\ \dots \\ d_{N1}, d_{N2}, d_{N3} \dots d_{NN} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_{i1} \\ w_{i2} \\ w_{i3} \\ \dots \\ w_{iN} \end{bmatrix},$$

где  $w_{ij}$  - глобальное взвешенное значение интеллектуального анализа данных панели оценки экономических рисков

предприятия в  $i$ -й точке, строится модель извлечения признаков панельных данных оценки экономических рисков предприятия, и интеллектуальный анализ данных выполняется в соответствии с результатами извлечения признаков.

Алгоритм кластеризации нечеткой информации принят для обработки кластеризации данных, и последовательность цифровых элементов, собранная в узле считывания  $i$ , выражается как, последовательность цифровых элементов, где количество панельных данных оценки экономического риска предприятия представляет собой взвешивание коэффициент панельного интеллектуального анализа данных оценки экономического риска предприятия [14, 15]. В сочетании с методом семантического анализа признаков устанавливается модель анализа правил нечетких семантических признаков панельного анализа данных оценки экономических рисков предприятия, а адаптивный весовой коэффициент панельных данных оценки экономических рисков предприятия получается следующим образом:

$$STDf_{i,j} = \frac{Freq_{i,j}}{\max_i Freq_{i,j}},$$

где,  $\max_i Freq_{i,j}$  – количество характеристик нечеткой идентификации панельных данных оценки экономического риска предприятия:

$$IDf_i = \log\left(\frac{N}{n_i}\right),$$

где  $w_{i,j} = tf_{i,j} \times IDf_i$

$d_i$  и  $d_j$  – атрибуты сходства прогнозирования экономических рисков предприятия. Используя метод нечеткой кластеризации, кратчайший путь поиска муравьиной колонии для интеллектуального анализа данных панели оценки экономических рисков предприятия рассчитывается следующим образом:

$$D(d_i, d_j) = \frac{d_i \cdot d_j}{\|d_i\| \times \|d_j\|}.$$

С использованием метода анализа статистической информации устанавливается набор нечетких признаков распределения интеллектуального анализа данных панели оценки экономических рисков предприятия:

$$P(K=T|R=1) = \frac{P(K=T)P(K=1|K=T)}{P(R=1)}$$

$$P(K=T) = \frac{|C|}{|S|}$$

$$P(R=1|K=1) = \frac{NB}{|C|}$$

$$P(R=1) = \frac{NS}{|S|},$$

где NB – размерность рекурсивного анализа графов, а NS – характерная величина нечеткости в нечеткой области S. В соответствии с приведенным выше анализом построена модель кластеризации слияния данных панели оценки экономических рисков предприятия, и прогнозирование данных оценки экономических рисков предприятия выполняется в соответствии с результатами кластеризации [16, 17].

На основе анализа статистической структуры панельных данных оценки экономического риска предприятия с

использованием метода региональной интеграции сеточного блока осуществляется прогнозирование и оптимизация панельных данных оценки экономического риска предприятия [18]. В данной статье предлагается метод прогнозирования экономических рисков предприятия, основанный на интеграции больших данных. В соответствии с результатами извлечения признаков панельных данных оценки экономического риска предприятия для обработки информации используется метод кластеризации нечетких С-средних, устанавливаются глобальные переменные и устанавливается коэффициент нечеткого разделения интеллектуального анализа данных панели оценки экономического риска предприятия следующим образом:

$$Mi = L_m + \frac{N \times 0.5 - \sum f_{less}}{f_m} \times width,$$

где  $Mi$  – среднее рекурсивное распределение энтропии прогнозирования экономического риска предприятия;

$L_m$  – минимальный порог;

$f_{less}$  – медиана данных панели оценки экономического риска предприятия;

$f_m$  – минимальное статистическое характеристическое количество данных оценки прогнозирования экономического риска предприятия во всех измерениях.

Построена модель количественного рекурсивного анализа данных панели оценки экономических рисков предприятия, и результаты извлечения рекурсивных энтропийных признаков представлены следующим образом:

$$\begin{cases} X = \{X[1], X[2] \dots X[N]\} \\ X[1] = (id_1, n_1) \\ X[N] = (id_m, n_m). \end{cases}$$

В рамках модели дерева решений применяется метод адаптивной оптимизации для извлечения рекурсивных энтропийных признаков из панельных данных оценки экономического риска предприятия, и прогнозирование данных оценки экономического риска предприятия выполняется в соответствии с результатами извлечения признаков.

С помощью приведенного выше анализа в сочетании с соотношением распределения рекурсивной энтропии по правилам осуществляется прогнозирование и оптимизация экономических рисков предприятия.

Количество рекурсивных энтропийных признаков данных извлекается, и для выполнения адаптивного сопоставления блоков на панельных данных оценки экономических рисков предприятия применяются количественный регрессионный анализ и метод нечеткой кластеризации, а подавление помех осуществляется путем объединения с соответствующим сопоставителем признаков [19, 20]. Процесс внедрения описывается следующими этапами:

1. Изучение векторной суммы информационного потока панельных данных оценки экономических рисков предприятия для данных  $x$  и  $x_{n+r}$ , выбор значения  $C$  для определения соответствующего коэффициента фильтрации панельных данных оценки экономическо-

го риска предприятия, если набор данных  $A_j(L)$ , создать  $m$  в качестве порядка фильтрации, при этом распределенное прогнозирование данных выполняется посредством метода анализа кластеризации слияния релевантности.

2. В соответствии с соотношением распределения рекурсивной энтропии корреляция между временем  $t$  и временем  $t + T$ , и центр кластеризации слияния  $F(x_i, A_j(L))$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $J = 1, 2, \dots, k$  панельных данных оценки экономических рисков предприятия.

3. При использовании метода сопоставления нечеткой корреляции выходные данные распределенного предсказания рекурсивной энтропийной функции получаются в соответствии со следующими требованиями:

$$D(x_i, A_j(L)) = \min \{D(x_i, A_j(L))\}.$$

4. Метод анализа признаков взаимной информации применяется для получения количественного признака категории  $S(t)$ , предсказываемого атрибутом данных, и выполняется многоуровневая итерация в центре кластеризации данных для получения среднего значения выходных данных итерации:

$$C(L) = \sum_{j=1}^k \sum_{k=1}^{n_j} (\|x_k^j - A_j(L)\|)^2.$$

5. При выполнении условия сходимости  $\|C(L) - C(L-1)\| < \zeta$ , программа завершается, в противном случае возвращается на шаг 2 для выполнения шага итерации прогнозирования экономического риска предприятия, и оптимизированный результат прогнозирования данных:

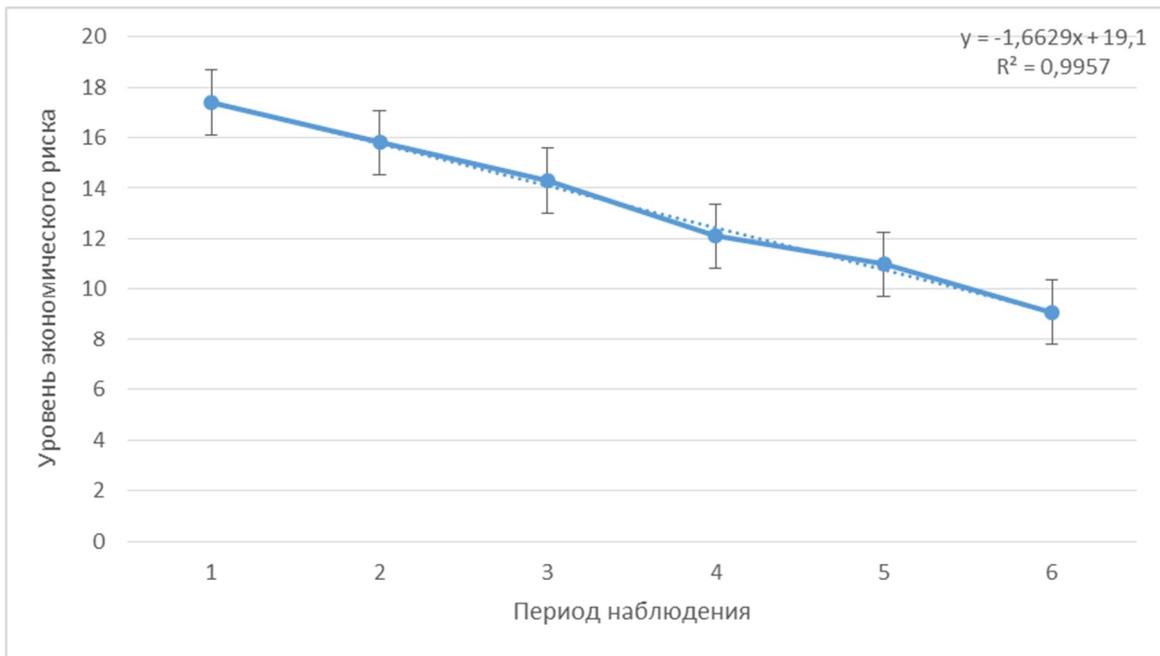
$$A_j(L+1) = 1/n_j \sum_{i=1}^k X_i^j \quad j=1, 2, \dots, k.$$

Посредством приведенного выше анализа в сочетании с соотношением распределения рекурсивной энтропии осуществляется прогнозирование и оптимизация экономических рисков предприятия.

### Результаты и их обсуждение

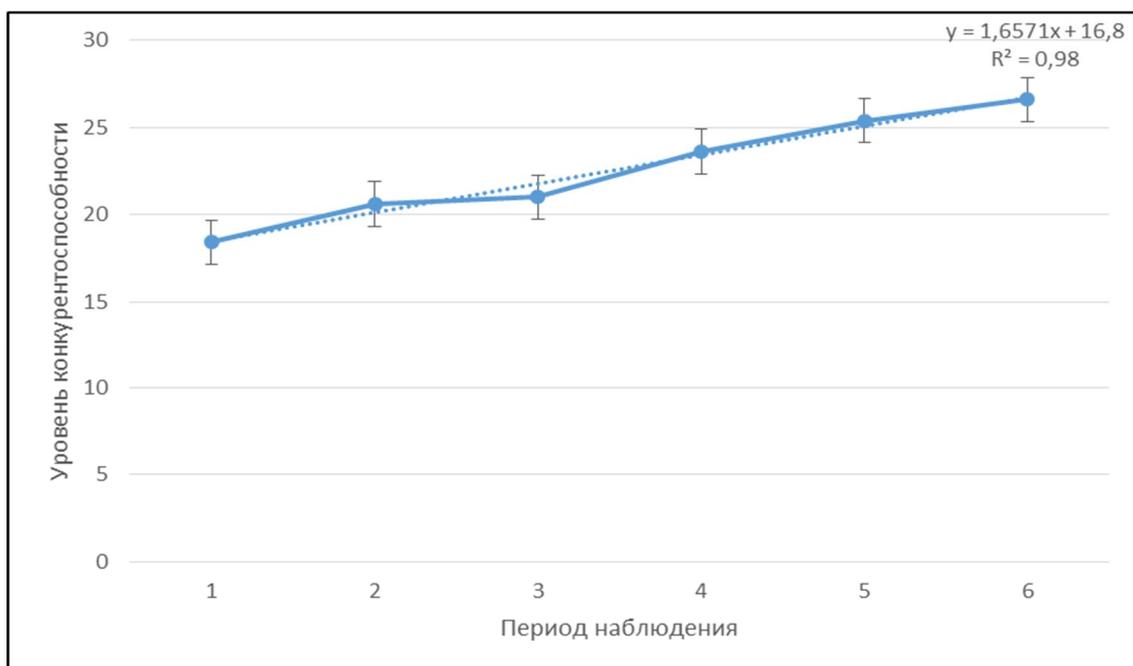
Чтобы проверить эффективность применения метода при реализации прогнозирования экономических рисков предприятия проводится тестовый анализ моделирования, и технология Data Mining применяется для выполнения алгоритмов обработки прогнозирования экономических рисков предприятия. На основе панельных данных строятся временные ряды уровня конкурентоспособности и экономического риска, используемые для дальнейшего прогнозирования развития предприятия. Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2. На основе полученных трендовых зависимостей могут быть получены прогнозные оценки уровня конкурентоспособности и экономического риска предприятия.

Используя полученные данные об уровнях конкурентоспособности и экономического риска, был выполнен кластерный анализ предприятий некоторой отрасли. Он позволил выделить три кластера. В первый попало  $\{Pr1\}$ , оно имеет высокий уровень конкурентоспособности и низкий уровень экономического риска.



**Рис. 1.** Прогнозирование уровня экономического риска

**Fig. 1.** Forecasting the level of economic risk



**Рис. 2.** Прогнозирование уровня конкурентоспособности

**Fig. 2.** Forecasting the level of competitiveness

Во второй кластер, со средним уровнем конкурентоспособности и экономического риска попали {ПР2, ПР3, ПР4, ПР6}, и в кластер с низким уровнем конкурентоспособности и высоким

уровнем экономического риска попало {ПР5} (к нему же можно отнести и прочие мелкие предприятия исследуемой отрасли). Полученные результаты представлены на рис. 3.

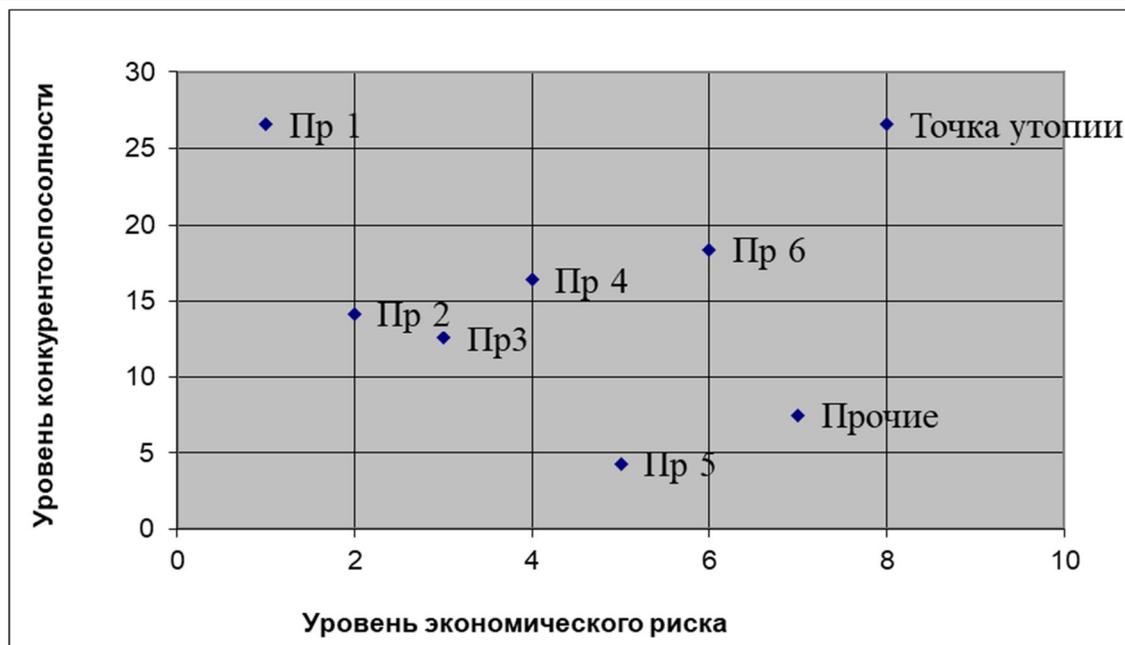


Рис. 3. Результаты кластерного анализа

Fig. 3. Results of cluster analysis

## Выводы

В работе получена модель прогнозирования панельных данных оценки экономического риска предприятия, проведён интеллектуальный анализ данных деятельности предприятий, позволяющий получить интегральные показатели их деятельности (уровень конкурентоспособности и уровень экономического риска).

В соответствии с методом адаптивного взвешенного обучения выполняется взвешивание пространственных признаков панельных данных оценки экономических рисков предприятия и комбинируется метод семантического ана-

лиза признаков. Создана модель анализа правил нечетких семантических признаков панельного интеллектуального анализа данных оценки экономических рисков предприятия. Статистический структурный анализ панельных данных оценки экономического риска предприятия выполняется методом регионального объединения блоков сетки, а подавление помех в процессе прогнозирования данных выполняется путем объединения метода сопоставления признаков ассоциации. Анализ показывает, что метод в этой статье имеет высокую точность и лучшую защиту от помех при прогнозировании данных.

## Список литературы

1. WANG Qing, BAI Xue, NIU Feng. The Systemic Risk Measurement and Influencing Factors of Commercial Banks----An Analysis Based on CCA-POT-Copula Method[J]. 2016, (02): 1-9

2. Dick CD, Menkhoff L. Exchange Rate Expectations of Chartists and Fundamentalists[J] // Journal of Economic Dynamics and Control. 2013. 37(7):1362-83
3. Конкурентоспособность персонала как условие эффективной деятельности предприятия / А. И. Торопова, А. С. Сочнева, А. Н. Бугрова [и др.] // Гуманитарные научные исследования. 2021. № 1(113). С. 14.
4. Узьяков М. Н., Узьяков Р. М. Конкурентоспособность Российской экономики: возможности измерения и графическая визуализация // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2020. № 18. С. 31-45. DOI 10.47711/2076-318-2020-31-45.
5. Воронцовский А. В. Оценка рисков. М. : Изд-во Юрайт, 2019. 179 с.
6. Воронцовский А. В. Управление рисками. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 414 с.
7. Вяткин В. Н., Гамза В. А., Маевский Ф. В. Риск-менеджмент. М. : Изд-во Юрайт, 2019. 365 с.
8. Андрианова Л. В. Конкурентоспособность как показатель эффективности деятельности предприятия // Via scientiarum - Дорога знаний. 2020. № 4. С. 13-16.
9. Мухина И. К. Концепция “биг дата” для бизнес решений (на примере сферы финансовых услуг) // Цифровая экономика и "Индустрия 4.0": проблемы и перспективы. 2017. С. 528-540.
10. Борисович К. К. Инструменты и системы для обработки и анализа информации данных в системах биг дата // Computer Science & Telecommunications. 2021. Т. 59. №. 1.
11. Мардонова А. А., Криволапов И. П., Фокин А. А. Анализ методов оценки рисков // Наука и Образование. 2020. Т. 3. №. 2.
12. Панягина А. Е. Обзор современных методов количественной оценки рисков // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2014. №. 3. С. 42-42.
13. Ланкина С. А., Флегонтов В. И. Классификация и проблемы оценки рисков промышленного предприятия // Вестник евразийской науки. 2015. Т. 7. №. 3 (28). С. 48.
14. Беляева М. С. Конкурентоспособность продукции предпринимательских структур: методология оценки в условиях цифровой экономики // Журнал правовых и экономических исследований. 2020. № 4. С. 173-181. DOI 10.26163/GIEF.2020.41.75.026.
15. Зверева Т. В. Экономические риски цифровой экономики // Проблемы анализа риска. 2017. Т. 14. № 6. С. 22-29.
16. Власов Д. А. Методический анализ новой образовательной области "Экономические риски" // Вестник по педагогике и психологии Южной Сибири. 2017. № 2. С. 19-28.
17. Тепоян П. А. Отрицательные экономические результаты и управленческие риски // Многоуровневое общественное воспроизводство: вопросы теории и практики. 2017. № 12(28). С. 167-170.

18. Панкова Е. И., Маринцев Д. А. Экономические риски при принятии управленческих решений // Вестник Ивановского государственного университета. Серия: Экономика. 2019. № 4(42). С. 125-128.

19. Старикова М. С., Чижова Е. Н., Щетинина Е. Д. Социально-экономические и маркетинговые риски технологического предпринимательства // Экономический вектор. 2020. № 1(20). С. 38-44. DOI 10.36807/2411-7269-2020-1-20-38-44.

20. Кот М. К., Белозерова О. А., Шпангель Ф. Ф. Цифровая экономика и правовые и экономические риски предпринимателей в РФ // Проблемы развития предприятий: теория и практика. 2018. № 4. С. 117-122.

### References

1. WANG Qing, BAI Xue, NIU Feng. The Systemic Risk Measurement and Influencing Factors of Commercial Banks----An Analysis Based on CCA-POT-Copula Method[J]. 2016, (02):1-9

2. Dick CD, Menkhoff L. Exchange Rate Expectations of Chartists and Fundamentalists [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2013, 37(7):1362-83

3. Toropova A. I., Sochneva A. S., Bugrova A. N. et al. Konkurentosposobnost' personala kak uslovie effektivnoi deyatel'nosti predpriyatiya [Personnel competitiveness as a condition for effective enterprise activity]. *Gumanitarnye nauchnye issledovaniya = Humanitarian Scientific Research*, 2021, no. 1(113), 14 p.

4. Uzyakov M. N., Uzyakov R. M. Konkurentosposobnost' Rossiiskoi ekonomiki: vozmozhnosti izmereniya i graficheskaya vizualizatsiya [Competitiveness of the Russian economy: measurement capabilities and graphical visualization]. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaistvennogo prognozirovaniya RAN = Scientific Works: Institute of National Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2020, no. 18, pp. 31-45. DOI 10.47711/2076-318-2020-31-45.

8. Andrianova L. V. Konkurentosposobnost' kak pokazatel' effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiya [Competitiveness as an indicator of the efficiency of an enterprise]. *Via scientiarum - The Road of knowledge*, 2020, no. 4, pp. 13-16.

14. Belyaeva M. S. Konkurentosposobnost' produktivnoy predprinimatel'skikh struktur: metodologiya otsenki v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki [Competitiveness of products of entrepreneurial structures: assessment methodology in the digital economy]. *Zhurnal pravovykh i ekonomicheskikh issledovaniy = Journal of Legal and Economic Research*, 2020, no. 4, pp. 173-181. DOI 10.26163/GIF.2020.41.75.026.

15. Zvereva T. V. Ekonomicheskie riski tsifrovoy ekonomiki [Economic risks of the digital economy]. *Problemy analiza riska = Problems of Risk Analysis*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 22-29.

18. Pankova E. I., Marintsev D. A. Ekonomicheskie riski pri prinyatii upravlencheskikh reshenii [Economic risks in managerial decision-making]. *Vestnik Ivanovskogo gosudar-*

19. Starikova M. S., Chizhova E. N., Shchetinina E. D. Sotsial'no-ekonomicheskie i marketingovye riski tekhnologicheskogo predprinimatel'stva [Socio-economic and marketing risks of technological entrepreneurship]. *Ekonomicheskii vektor = Economic Vector*, 2020, no. 1(20), pp. 38-44. DOI 10.36807/2411-7269-2020-1-20-38-44.

20. Kot M. K., Belozerova O. A., Shpanagel F. F. Tsifrovaya ekonomika i pravovye i ekonomicheskie riski predprinimatelei v RF [Digital economy and legal and economic risks of entrepreneurs in the Russian Federation]. *Problemy razvitiya predpriyatii: teoriya i praktika = Problems of Enterprise Development: Theory and Practice*, 2018, no. 4, pp. 117-122.

16. Vlasov D. A. Metodicheskii analiz novoi obrazovatel'noi oblasti "Ekonomicheskie riski" [Methodical analysis of the new educational field "Economic risks"]. *Vestnik po pedagogike i psikhologii Yuzhnoi Sibiri = Bulletin on Pedagogy and Psychology of Southern Siberia*, 2017, no. 2, pp. 19-28.

12. Tepoyan P. A. Otritsatel'nye ekonomicheskie rezul'taty i upravlencheskie riski [Negative economic results and management risks]. *Mnogourovnevoe obshchestvennoe vosproizvodstvo: voprosy teorii i praktiki = Multilevel Social Reproduction: Issues of Theory and Practice*, 2017, no. 12(28), pp. 167-170.

5. Vorontsovsky A.V. *Otsenka riskov* [Risk assessment]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 179 p.

14. Vorontsovsky A.V. *Upravlenie riskami* [Risk management]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 414 p.

7. Vyatkin V. N., Gamza V. A., Mayevsky F. V. *Risk-menedzhment* [Risk management] Moscow, Yurayt Publ., 2019. 365 p.

9. Mukhina I. K. Kontsepsiya "big data" dlya biznes reshenii (na primere sfery finansovykh uslug) [The concept of "big data" for business solutions (on the example of the financial services sector)]. *Tsifrovaya ekonomika i "Industriya 4.0": problemy i perspektivy = Digital Economy and "Industry 4.0": Problems and Prospects*, 2017, pp. 528-540.

10. Borisovich K. K. Instrumenty i sistemy dlya obrabotki i analiza informatsii dannykh v sistemakh big data [Tools and systems for processing and analyzing data information in big data systems]. *Computer Science & Telecommunications*, 2021, vol. 59, no. 1.

11. Mardonova A. A., Krivolapov I. P., Fokin A. A. Analiz metodov otsenki riskov [Analysis of risk assessment methods]. *Nauka i Obrazovanie = Science and Education*, 2020, vol. 3, no. 2.

13. Lankina S. A., Flegontov V. I. Klassifikatsiya i problemy otsenki riskov promyshlennogo predpriyatiya [Classification and problems of risk assessment of an industrial enterprise]. *Vestnik evraziiskoi nauki = Bulletin of Eurasian Science*, 2015, vol. 7, no. 3 (28), 48 p.

12. Panyagina A. E. Obzor sovremennykh metodov kolichestvennoi otsenki riskov [Review of modern methods of quantitative risk assessment]. *Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologii = Economics and Management of Innovative Technologies*, 2014, no. 3, pp. 42-42.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Халин Юрий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Yuri A. Khalin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Криушина Юлия Алексеевна**, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: July.tchict@yandex.ru

**Yulia A. Kriushina**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: july.tchict@yandex.ru

**Зинкин Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Sergey A. Zinkin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computer Engineering Department, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Шилин Александр Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Alexander A. Shilin**, , Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, Energy Engineering School, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

## Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы

Д.В. Афонин<sup>1</sup> ✉, О.Б. Кочергин<sup>1</sup>, С.Ф. Яцун<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

### Резюме

**Актуальность.** Развитие авиационной техники связано с разработкой новых средств, непосредственно обеспечивающих перемещение воздушных судов (ВС) по аэродрому. Для осуществления наземных маневров с ВС применяют буксировочные аэродромные системы (БАС), что позволяет значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива. Также БАС применяется тогда, когда ВС теряет способность двигаться и находится на рабочей площадке аэродрома или вблизи нее, что создает серьезную проблему, приводящую к закрытию аэропорта для полетов, при этом авиакомпании несут значительные потери.

**Цель исследования.** Повышение эффективности буксировочной аэродромной системы за счет разработки информационной системы.

**Задачи.** Разработка структуры роботизированной буксировочной аэродромной системы, составление структурной схемы САУ макета буксировочной платформы, оформление блок-схем логического регулятора САУ платформы.

**Методы.** Для решения проблемы транспортировки ВС используются методы перемещения, в которых качестве задающего воздействия, определяющего положение платформы в пространстве, был выбран уровень горизонтального отклонения платформы от контрастной линии, который измеряется путём анализа изображений, поступающих с установленной на буксировщик системой технического зрения.

**Результаты.** В ходе научной работы была разработана структура роботизированной буксировочной аэродромной системы. На основании данной структуры была спроектирована структурная схема САУ макета буксировочной платформы и разработана блок-схема логического регулятора САУ платформы.

**Заключение.** 1. Разработана структура роботизированной буксировочной аэродромной системы, включающей мобильный буксировщик, сцепное устройство, воздушное судно, бортовую систему управления. 2. Разработан алгоритм управления позиционированием роботизированной буксировочной аэродромной системой, основанный на логической обработке сигналов оптронной матрицы. 3. Разработаны алгоритмы управления движением РБАС по заданной контрастной линии при действии внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного типа, позволяющие обеспечить высокоточное движение РМБ.

**Ключевые слова:** аэродромная система; буксировщик; система управления; информационная система; воздушное судно; СТЗ.

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

**Финансирование:** Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека».

**Для цитирования:** Афонин Д.В., Кочергин О.Б., Яцун С. Ф. Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 162-178. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-162-178>.

Поступила в редакцию 12.09.2022

Подписана в печать 06.10.2022

Опубликована 14.10.2022

## Information System of the Robotic Towing Airfield System

Dmitrii V. Afonin <sup>1</sup> ✉, Oleg B. Kochergin <sup>1</sup>, Sergey F. Yatsun <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

### Abstract

**Relevance.** The development of aviation technology is associated with the development of new means that directly ensure the movement of aircraft (AF) at the airfield. To carry out ground maneuvers with aircraft, towing airfield systems (UAS) are used, which can significantly reduce noise and air pollution near the airport, as well as reduce the inefficient resource consumption of aircraft engines and provide significant savings in aviation fuel. UAS is also used when the aircraft loses the ability to move and is located on or near the working area of the airfield, which creates a serious problem leading to the closure of the airport for flights, while airlines incur significant losses.

**Purpose of research.** Improving the efficiency of the towing airfield system through the development of an information system. Objectives. Development of the structure of a robotic towing airfield system, drawing up a structural diagram of the ACS layout of the towing platform, design of block diagrams of the logical controller of the ACS platform.

**Methods.** The level of horizontal deviation of the platform from the contrast line was chosen as the setting influence determining the position of the platform in space, which is measured by analyzing images coming from the technical vision system installed on the tow truck.

**Results.** In the course of the study, the structure of a robotic towing airfield system was developed. Based on this structure, a block diagram of the ACS layout of the towing platform was designed and a block diagram of the logical controller of the ACS platform was developed.

**Conclusions.** 1. The structure of a robotic towing airfield system has been developed, including a mobile tow truck, a coupling device, an aircraft, and an on-board control system. 2. An algorithm for controlling the positioning of a robotic towing airfield system based on the logical processing of signals of an optocoupler matrix has been developed. 3. Algorithms have been developed for controlling the movement of the RBAS along a given contrast line under the action of external disturbing influences of a deterministic and random type, allowing for high-precision movement of the RMB.

**Keywords:** airfield system, tow truck, control system, information system, aircraft

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

**Funding:** The paper was prepared with the support of the Strategic Project «Priority-2030. Creation of robotic tools to expand the functionality of a person».

**For citation:** Afonin D. V., Kochergin O. B., Yatsun S. F. Information System of the Robotic Towing Airfield System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 162-178 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-162-178>.

Received 12.09.2022

Accepted 06.10.2022

Published 14.10.2022

## Введение

Развитие авиационной техники связано с разработкой новых средств, непосредственно обеспечивающих перемещение воздушных судов (ВС) по аэродрому. Для осуществления наземных маневров с ВС применяют буксировочные аэродромные системы (БАС), что позволяет значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива<sup>1</sup> [1-4]. Также БАС применяется тогда, когда ВС теряет способность двигаться и находится на рабочей площади аэродрома или вблизи нее, что создает серьезную проблему, приводящую к закрытию аэропорта для полетов, при этом авиакомпании несут значительные потери. Известны десятки случаев, когда буксируемое ВС сталкивалось с другими ВС и объектами инфраструктуры аэропорта. Движение буксируемого ВС должно производиться в соответствии со схемой движения самолетов и транспорта на данном аэродроме по определенным маршрутам, которые проходят по рулежным дорожкам и иногда по взлетно-посадочной полосе (ВПП) [5-12].

Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем

буксировки ВС является переход к новым технологиям на основе применения роботизированных мобильных буксировщиков (РМБ). Роботизированная БАС (РБАС), позволяет значительно сократить численность буксировочной бригады и перейти к беспилотным комплексам, решающим задачи доставки воздушного судна из начального положения в конечное, в автономном режиме, что позволит повысить безопасность и обеспечить максимальную скорость движения ВС по заданному маршруту [14-19]. Особое внимание должно быть уделено оценке состояния РБАС и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в среде функционирования. Создание РБАС предполагает разработку информационной системы, обеспечивающей систему управления полным набором данных, необходимых для выработки единственно правильного управления, которое обеспечивает заданные качественные показатели.

## Материалы и методы

Структурная схема роботизированной БАС приведена на рис. 1. С внешней средой РБАС взаимодействует через подсистему глобальной навигации (СГН), подсистему локальной навигации (СЛН), подсистему предотвращения столкновений (СПС). Система управления включает блок планирования, обеспечивающий построение карты аэродрома и построение карты

<sup>1</sup> Salmerón Rodríguez J. Use of robotic systems on airport management optimization: дис. Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.

ближней зоны, построение маршрута и построение траектории обхода препятствий. Блок управления (БУ) обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, и формирует управляющие напряжения по соответствующему алгоритму. Электроприводы РМБ под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС обеспечивает эффективное торможение РБАС.

Электроприводы РМБ под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС

обеспечивает эффективное торможение РБАС. Управляемое движение РМБ в сторону переднего колеса начинается при выполнении условия  $|\Delta\bar{r}_0| \leq L$ , где  $\bar{r}_{OD_1} - \bar{r}_{OD_2} = \Delta\bar{r}_0$  – расстояние между сцепным устройством (СУ), положение которого определяет вектор  $\bar{r}_{OD_1}$  и передним колесом, положение которого задано вектором  $\bar{r}_{OD_2}$ ;  $L$  – заданный параметр. Процесс движения РМБ завершается при  $\bar{r}_{OD_1} = \bar{r}_{OD_2}$ . Далее манипулятор СУ осуществляет захват переднего колеса ВС.

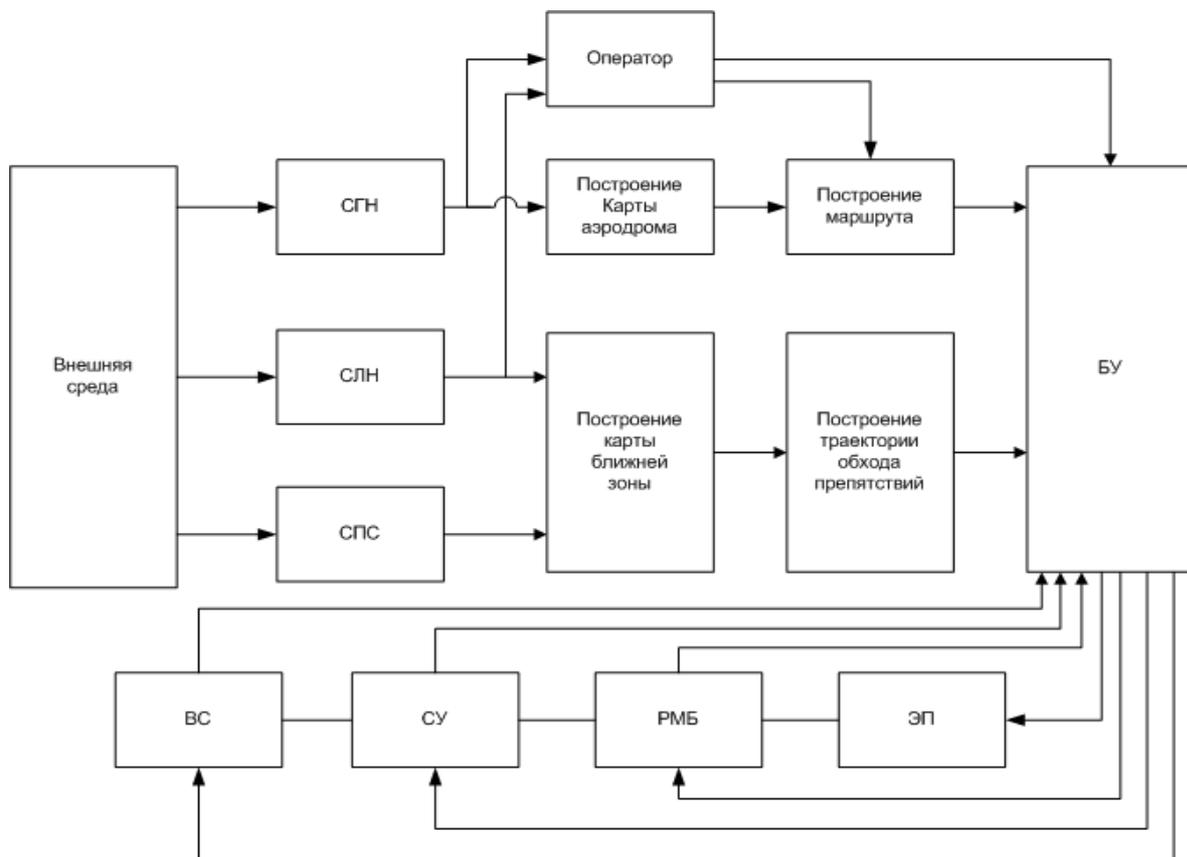


Рис. 1. Структурная схема роботизированной БАС

Fig. 1. Block diagram of a robotic towing platform

## Результаты и их обсуждение

В качестве задающего воздействия, определяющего положение платформы в пространстве, был выбран уровень горизонтального отклонения платформы от контрастной линии, который измеряется путём анализа изображений, поступающих с установленной на платформу СТЗ. Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

Для распределения нагрузки между узлами системы управления, ей был придан модульный характер. В качестве

«командного центра» платформы выступает одноплатный компьютер Raspberry Pi4. Он обрабатывает данные с СТЗ и на их основании, а также на основании информации об окружающих платформу препятствиях и углового отклонения корпуса, поступающих с блока системы навигации буксировщика отправляет в блок управления приводами набор команд, определяющих характер движения платформы, а также положение схвата (открыт/закрыт).

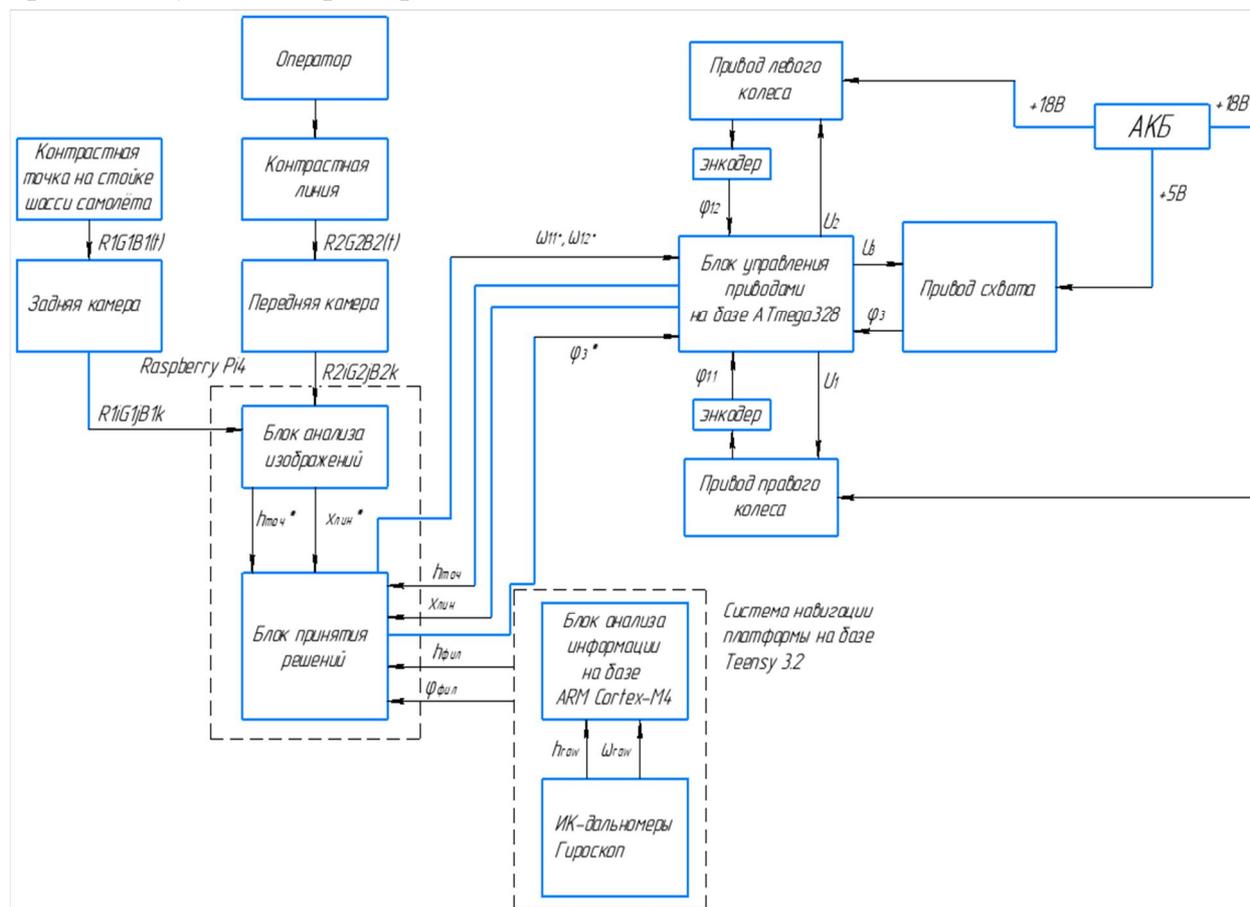


Рис. 2. Структурная схема САУ макета буксировочной платформы

Fig. 2. Block diagram of the ACS layout of the towing platform

Структурная схема САУ приводом, отвечающим за движение платформы, изображена на рис. 3. Согласно схеме, с

блока задающих воздействий система управления два параметра, а именно: координата центра масс контрастной

линии и координата центра масс контрастной точки, расположенной на передней стойке шасси транспортируемого самолёта. Данные параметры поступают на логический оператор, который, в соответствии с текущим режимом работы выбирает одно из этих значений в качестве управляющего и на их основе формирует управляющий вектор  $d$ , определяющий значение угловой скорости привода буксировщика.

Блок-схема логического регулятора изображена на рис. 4. Для привода левого колеса схема САУ аналогична.

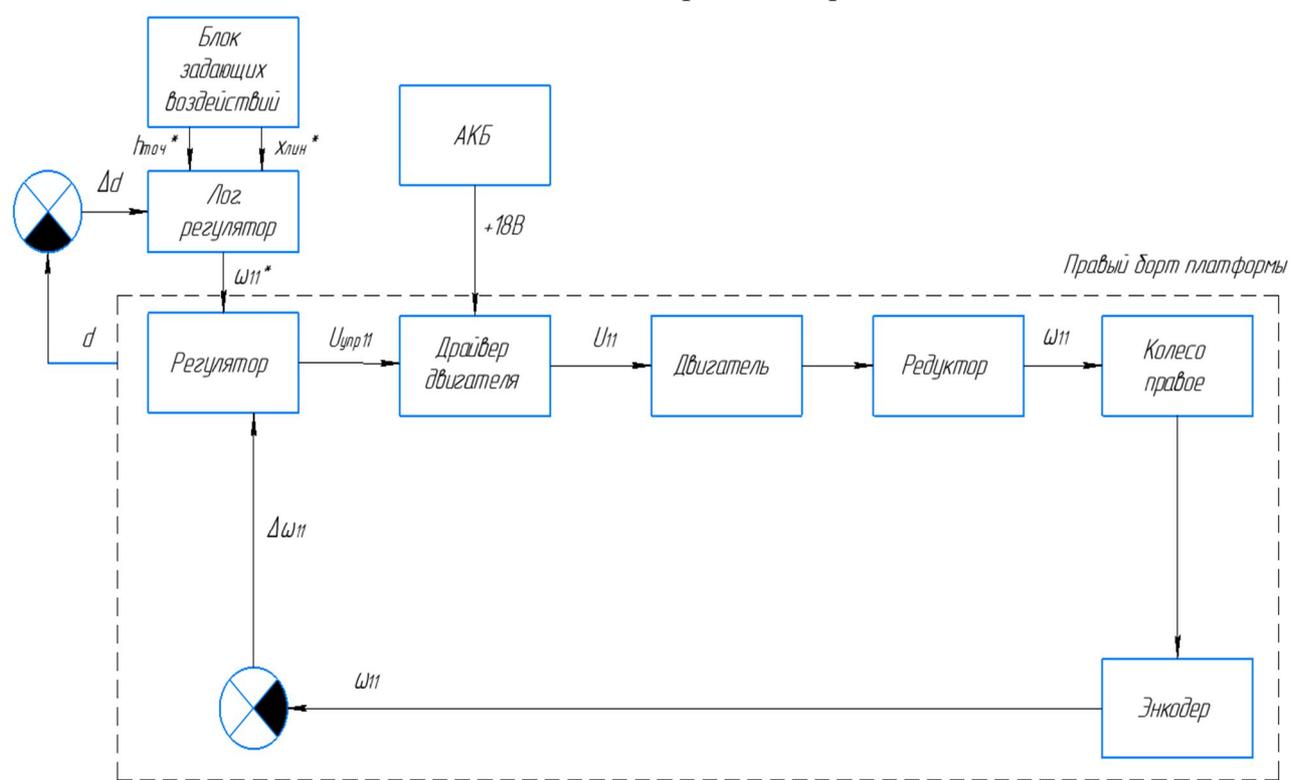


Рис. 3. Структурная схема САУ правого борта буксировщика

Fig. 3. Structural diagram of the control system of the starboard side of the towing vehicle

В том случае, если движению платформы не препятствуют посторонние объекты и буксировщик не добрался до конечной точки своего маршрута,

На рис. 5 изображена структурная схема САУ схвата макета мобильной буксировочной платформы. В данной САУ управляющим воздействием является расстояние, получаемое с установленного на платформу дальномера. Когда оно достигает заданного значения  $L$ , буксировщик посылает управляющее напряжение  $U_3$  на сервопривод схвата, осуществляя закрытие схвата и фиксацию передней стойки шасси самолёта. Блок схема логического регулятора в частности и всего режима стыковки в целом, отвечающего за работу схвата, изображена на рис. 6.

он осуществляет процесс движения по контрастной линии (рис. 7).

Анализируя поступающую с СТЗ информацию, система управления фор-

мирует управляющий вектор, основываясь на разности координат между центром масс контрастной линии и геометрическим центром исследуемого кадра. Схематично процесс формирования ошибки представлен на рис. 8. В первом случае центр масс контрастной линии  $O(x;y)$  и геометрический центр кадра  $O1(x1;y1)$  совпадают друг с другом, поэтому  $\Delta x$  равна нулю. Во втором

случае геометрический центр платформы находится правее центра масс контрастной линии на величину, равную  $\Delta x$ . Это говорит о том, что буксировщик также сместилась вправо относительно контрастной линии и необходимо посредством изменения скоростей приводов платформы осуществить её поворот.

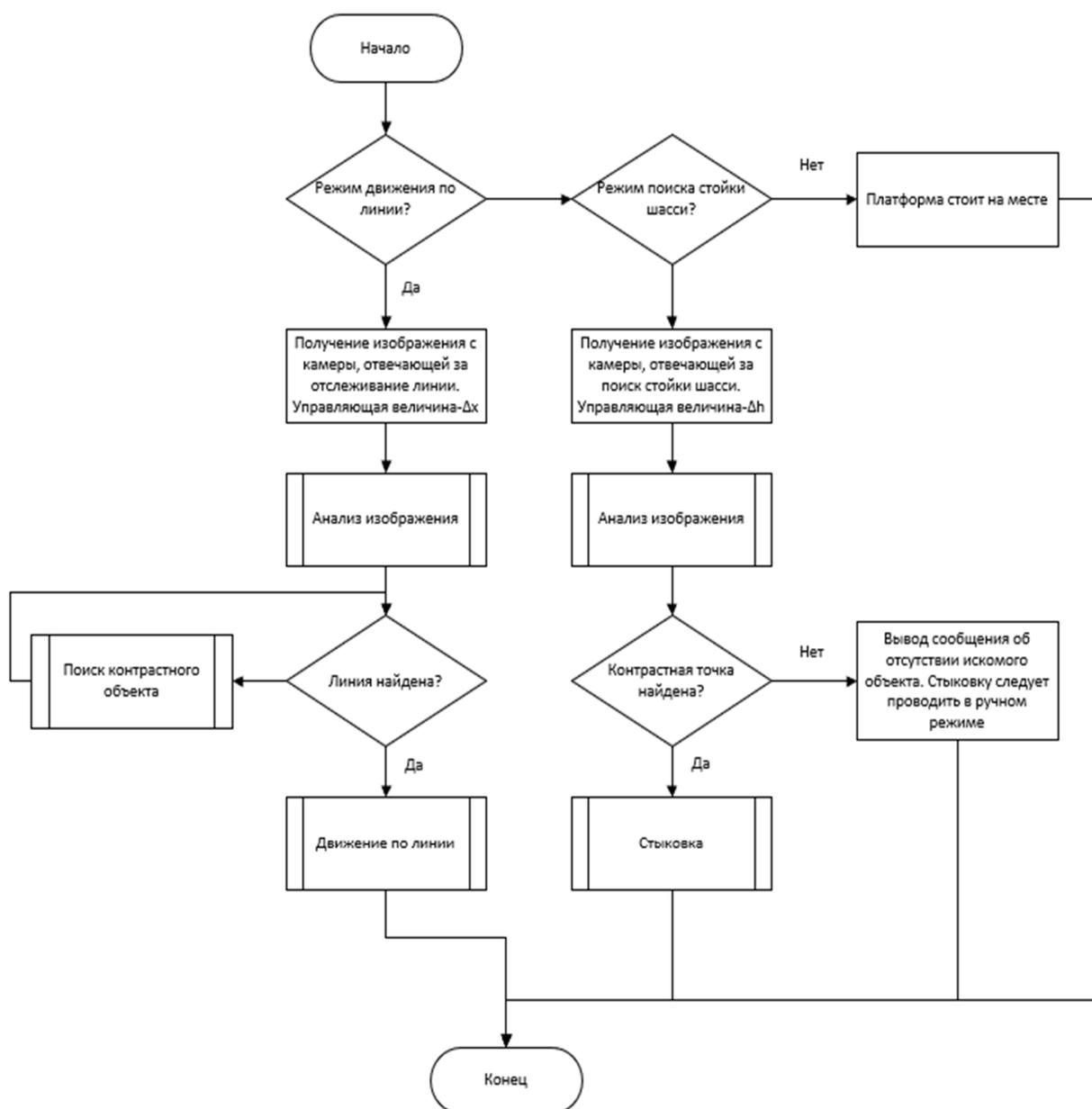


Рис. 4. Блок-схема логического регулятора САУ

Fig. 4. Block diagram of the ACS logic controller

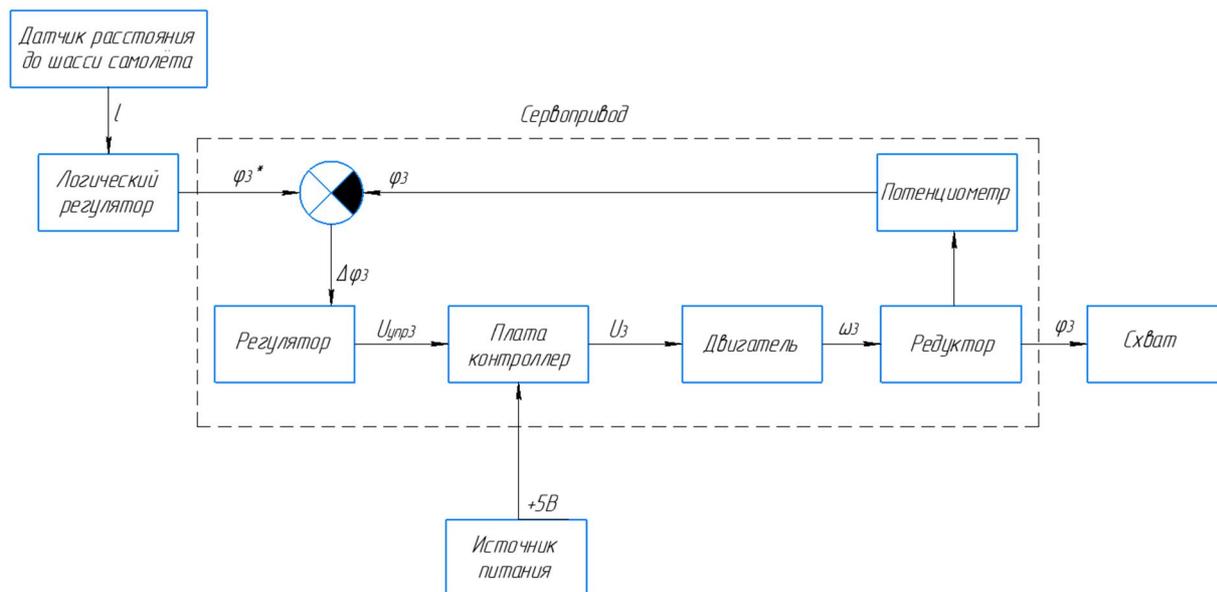


Рис. 5. Структурная схема схвата

Fig. 5. Structural diagram of the gripper

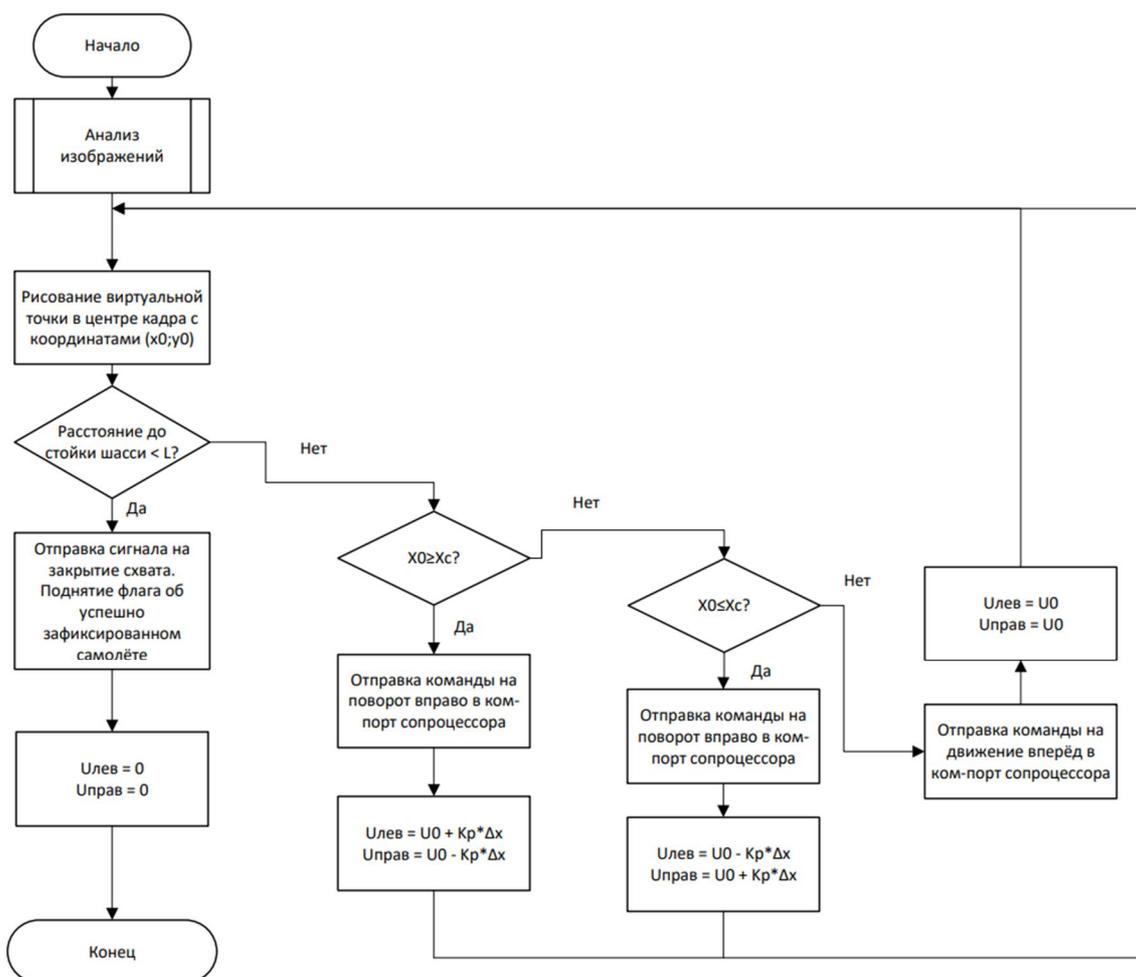


Рис. 6. Блок-схема алгоритма стыковки буксировщика и самолёта

Fig. 6. Block diagram of the algorithm for docking a towing vehicle and an aircraft

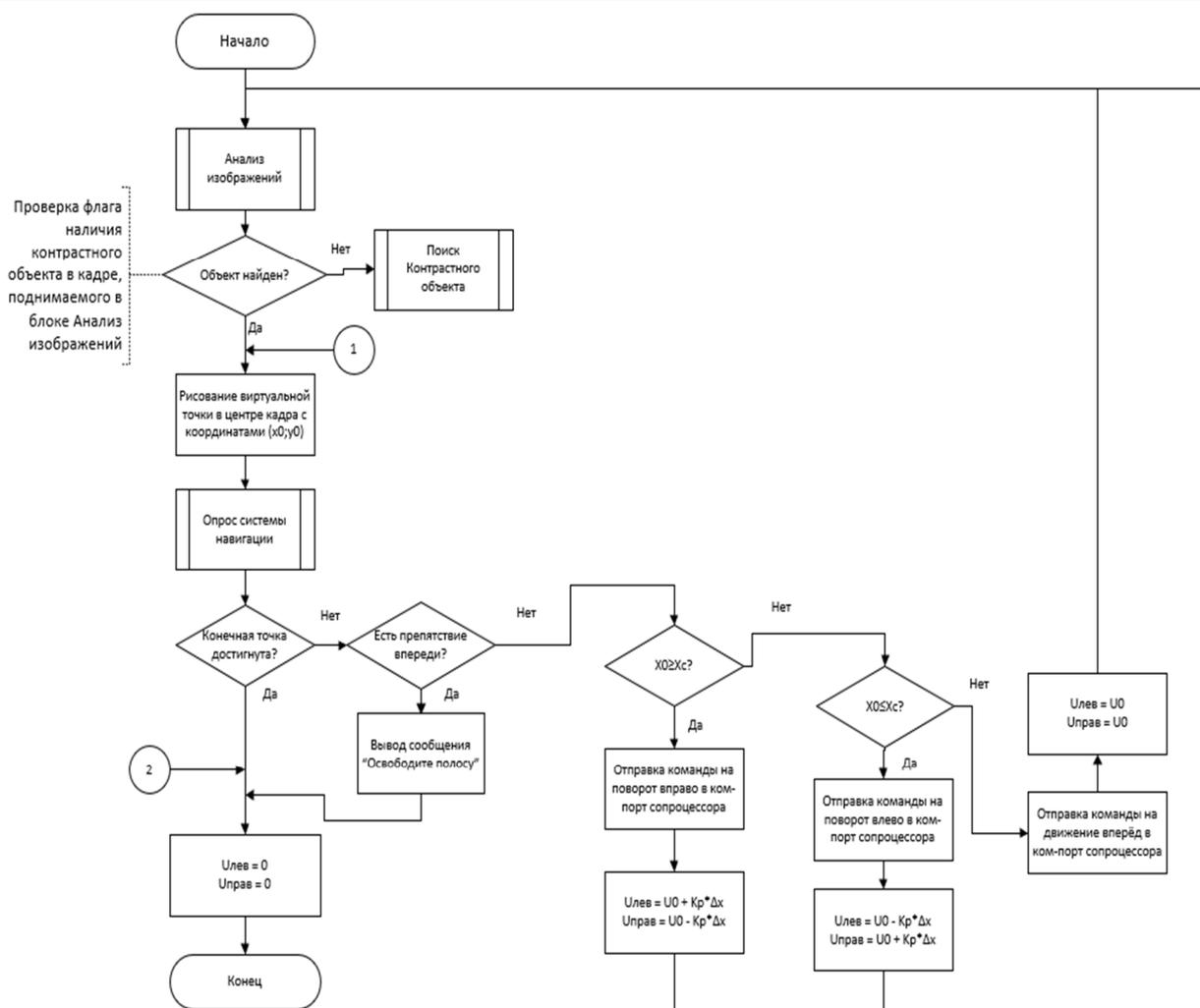


Рис. 7. Блок схема алгоритма движения платформы по линии

Fig. 7. Block diagram of the algorithm for moving the platform along the line

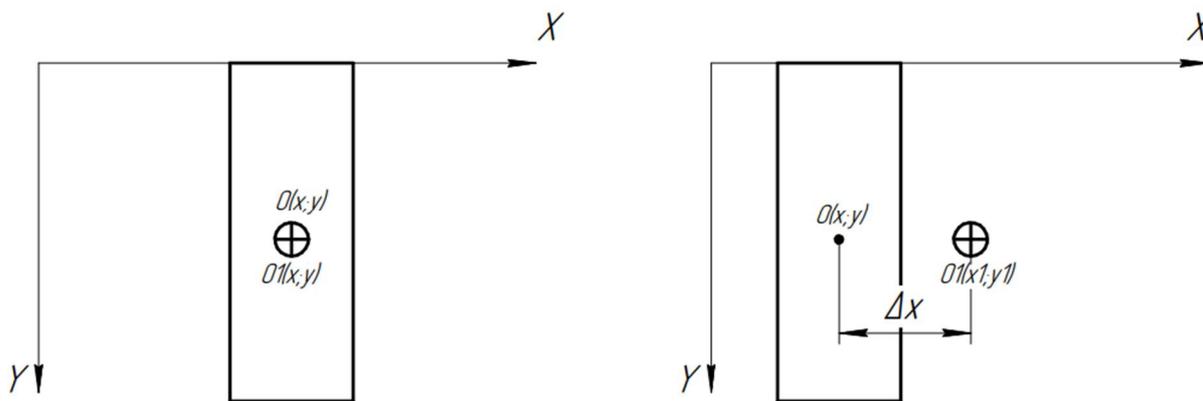


Рис. 8. Формирование ошибки системы управления

Fig. 8. Formation of an error in the control system

В случае утери платформой контрастной линии система управления платформой инициирует подпрограмму «Поиск контрастного объекта» (рис 9). После опроса датчиков платформы и измерения расстояния до препятствия производится проверка значения расстояния до объектов, окружающих буксировщик. В том случае, если значение расстояния превышает 20 см, буксировщик осуществляет поворот на месте, что достигается вращением колёс с одинаковой скоростью, но разным

направлением. Поворот осуществляется, основываясь на данных, получаемых с гироскопа. После того, как значение поворота платформы достигнет  $20^\circ$ , но буксировщик не найдёт контрастную линию, она поворачивает на  $-20^\circ$  относительно своего первоначального положения. В случае, если контрастная линия была найдена в процессе исполнения подпрограммы «Поиск контрастного объекта» буксировщик возвращается к движению.

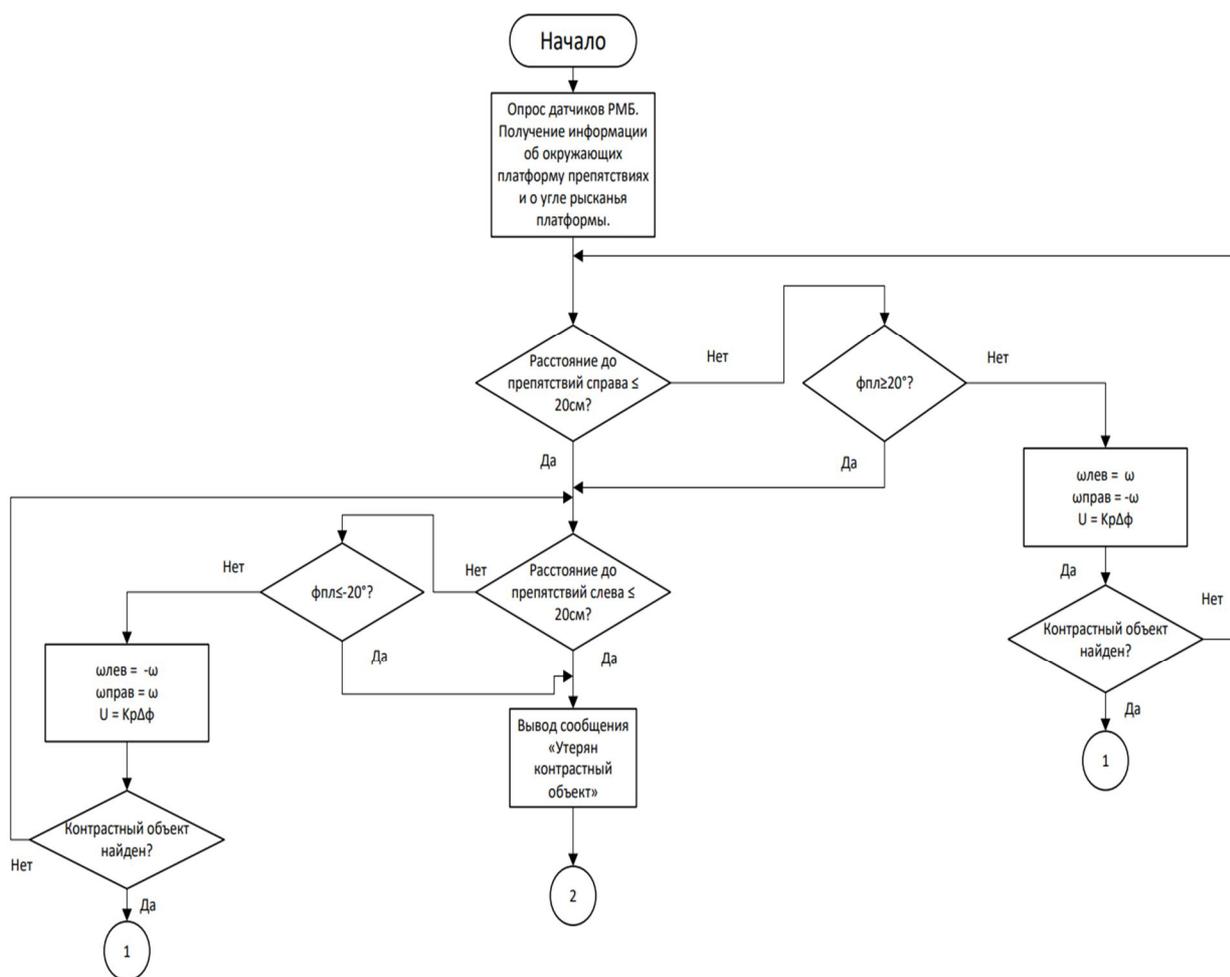


Рис. 9. Блок-схема подпрограммы «Поиск контрастного объекта»

Fig. 9. Flowchart of the subroutine "Search for a contrasting object"

Если же в процессе поиска контрастного объекта искомое не было найдено, буксировщик выводит сообщение об утере контрастного объекта и необходимости осуществить перемещение в ручном режиме.

В процессе движения буксировщик осуществляет опрос датчиков расстояния и на основании полученных с них данных принимает решение о прекращении движения. Работа блок-схемы подсистемы «**Опрос системы навигации**» изображена на рис. 10.

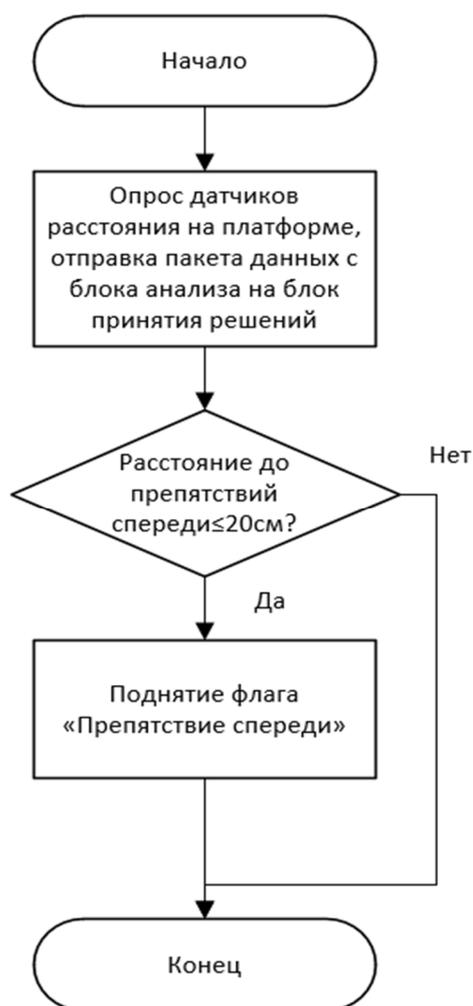


Рис. 10. Блок-схема системы «Опрос системы навигации»

Fig. 10. Block diagram of the "Navigation System Interrogation" system

В случае, если расстояние от платформы до препятствия становится меньше 20 см, буксировщик останавливается и отправляет сообщение о необходимости освободить дорогу.

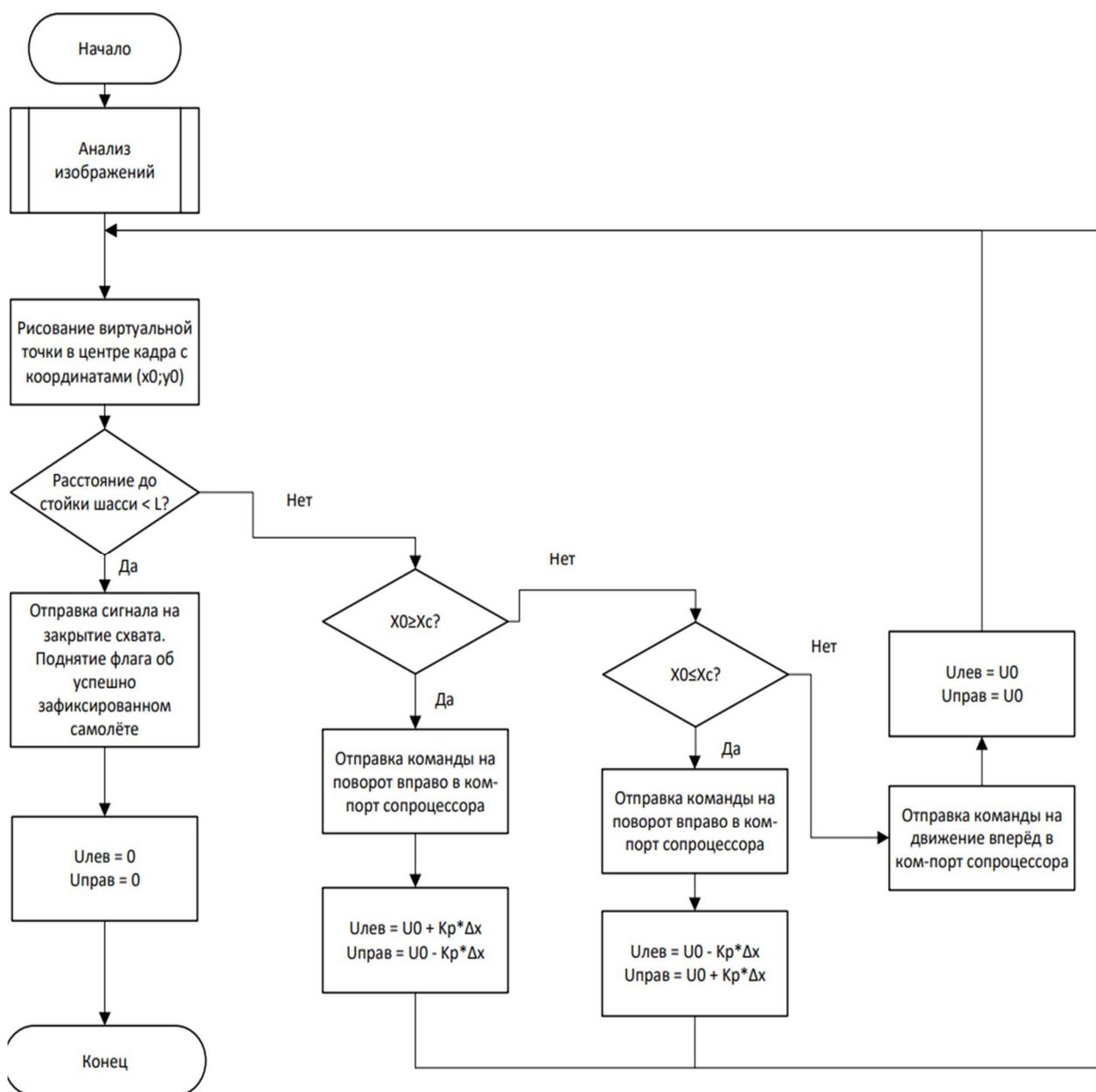
После того, как буксировщик достигает стоянки самолёта или взлётной полосы, она переходит из режима следования по линии в режим стыковки. В данном режиме задающим воздействием является уровень горизонтального отклонения платформы от контрастной точки, расположенной на передней стойке шасси самолёта, получаемый благодаря анализу получаемого с задней СТЗ изображения, а также значение расстояния до стойки шасси, получаемого с установленного на платформу дальномера (рис. 11). По достижению заданного значения расстояния, обозначенного на блок-схеме как  $L$ , буксировщик останавливается. До этого момента буксировщик движется вперёд по алгоритму, схожему с алгоритмом движения по контрастной линии.

Реализация режима стыковки в автоматическом порядке возможна лишь в том случае, если передняя стойка шасси самолёта расположена на линии, по которой буксировщик осуществляет своё движение.

При перемещении РБАС по кусочно-линейной траектории с применением исследуемого алгоритма, буксировщик высокоточно способен маневрировать на сложных участках пути. Результаты движения РБАС представлены на рис. 12.

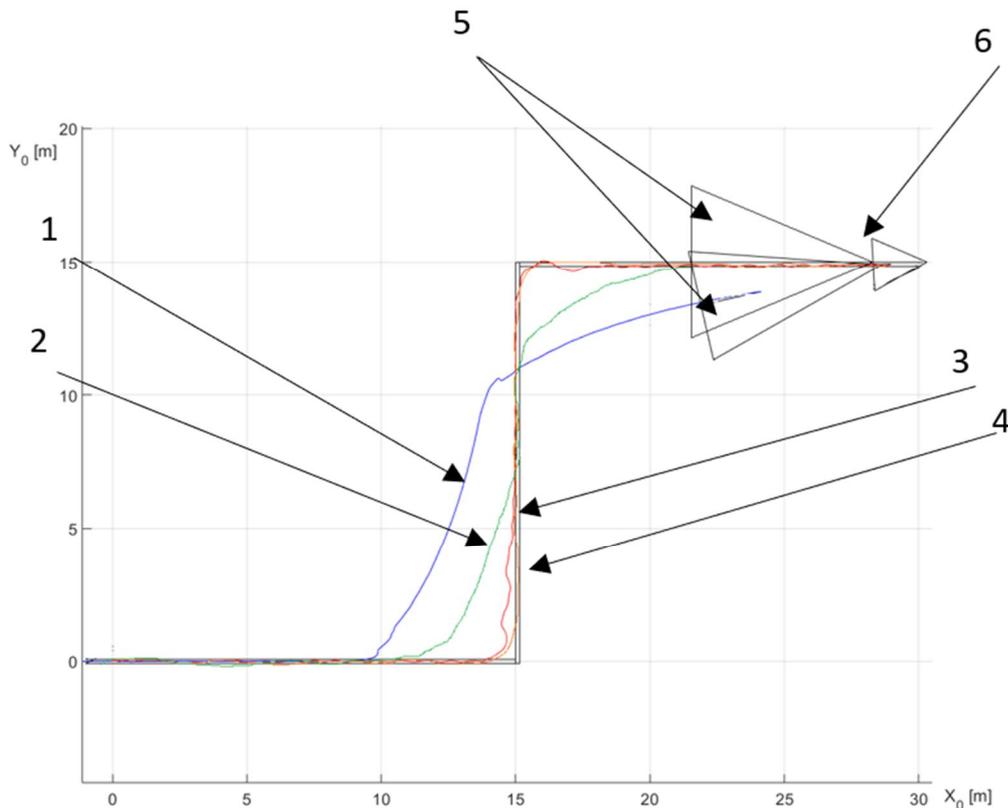
Сравнивая полученные результаты с данными, представленными в работе [13], в которой рассматривалось движение буксировщика, использующего оптронную матрицу, можно сделать вывод

о том, что алгоритм, предложенный в работе, обеспечивает большую точность и меньшие энергозатраты, нежели чем аналогичный алгоритм (табл. 1).



**Рис. 11.** Блок-схема алгоритма стыковки самолёта с передней стойкой шасси

**Fig. 11.** Block diagram of the aircraft docking algorithm with the front landing gear



**Рис. 12.** Траектория движения по алгоритму с использованием СТЗ: **1** – траектория движения ВС при перемещении по алгоритму с использованием оптронной матрицы; **2** – траектория движения ВС при перемещении по алгоритму с использованием СТЗ; **3** – траектория движения буксировщика при перемещении по алгоритму с использованием оптронной матрицы; **4** – траектория движения буксировщика при перемещении по алгоритму с использованием СТЗ; **5** – ВС; **6** – буксировщик

**Fig. 12.** Movement trajectory according to the algorithm using VS: **1** – Aircraft movement trajectory when moving according to the algorithm using the optocoupler matrix; **2** – Aircraft movement trajectory when moving according to the algorithm using the VS; **3** – Towing vehicle movement trajectory when moving according to the algorithm using the optocoupler matrix; **4** – Towing vehicle movement trajectory when moving according to the algorithm using STZ; **5** – aircraft; **6** - towing vehicle

**Таблица 1.** Сравнение результатов работы алгоритмов

**Table 1.** Comparison of the results of the algorithms

Тип управления / Type of control	Комбинированное управление с использованием оптронной матрицы / Combined control with the use of an optocoupler matrix	Управление с использованием СТЗ / Management using STZ
Критерий / Criteria		
Среднеквадратичная ошибка	12.67	7,44
Среднеквадратичные энергозатраты	$1.885 \cdot 10^9$	$1,247 \cdot 10^9$

## Выводы

1. Разработана структура роботизированной буксировочной аэродромной системы, включающей мобильный буксировщик, сцепное устройство, воздушное судно, бортовую систему управления.

2. Разработан алгоритм управления позиционированием роботизированной буксировочной аэродромной системой, основанный на логической обработке сигналов оптронной матрицы.

3. Разработаны алгоритмы управления движением РБАС по заданной контрастной линии при действии внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного типа, позволяющие обеспечить высокоточное движение РМБ.

4. Проведён сравнительный анализ системы управления с СТЗ и системы управления с оптронной матрицей. Алгоритм СТЗ показал себя как более точный метод для осуществления перемещения буксировщика.

## Список литературы

1. Казанцева П. И., Шевцова Н. В. Современные проблемы гражданской авиации России // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 3. №. 13. С. 458-459.

2. Maulana R. R., Wibowo S. S. Design and Manufacture of Remote Control Towing Tug for Cessna 172 Aircraft: Structural Analysis // Seminar Nasional Industri dan Teknologi, 2021. P. 525-532.

3. Vaaren E., Roling P. C. Design of a zero emission aircraft towing system, AIAA Aviation, 2019 // Forum. 2019. P. 2932.

4. Роботизированная система для наземного транспортирования воздушных судов / А. В. Великанов, Д. Е. Дьяков, Л. А. Великанова, Н. А. Дьякова // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. №37. С. 42-52.

5. Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun S. F. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft // Frontiers in Robotics and Electromechanics. 2023, Springer. P. 327-339.

6. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартенев, Е. Н. Политов, Д. В. Афонин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т.22, №2(77). С. 34-43.

7. An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot / N. T. Binh, N. A. Tung, D. P. Nam, N. H. Quang // International Journal of Control, Automation and Systems. 2019, Т. 17. С. 465-473.

8. A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs / G., Sirigu M. Cassaro, M. Battipede, P. Gili // WSEAS Transactions on Electronics. 2017. №8. P.27-40.

9. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics

10. Simon J. Autonomous wheeled mobile robot control // *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS 2017*. 15(3). P.222-227.

11. Adaptive predictive control of a differential drive robot tuned with reinforcement learning / P. T. Jardine, M. Kogan, S. N. Givigi, S. Yousefi // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2019. 33(2). P.410-423.

12. Shih C. L., Lin L. C. Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application // *Robotics*. 2017. 6(3). P. 17.

13. Афонин Д.В., Печурин А.С., Яцун С.Ф. Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолёта с помощью сигналов оптронной матрицы // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022; 26(3): 63-80. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>

14. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application // *19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*. IEEE, 2016. P. 480-483.

15. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. T. 139. P. 284-293.

16. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment // *IEEE Access*. 2019. T. 7. P. 82337-82348.

17. Saenz A. et al. Velocity control of an omnidirectional wheeled mobile robot using computed voltage control with visual feedback: Experimental results // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2021. T. 19. №. 2. P. 1089-1102.

18. Ефремов К.С., Шестаков В.А. Исследование базовых маневров движения многозвенных колесных роботов // *Выставка инноваций-2020 (весенняя сессия)*. 2020. С. 69.

19. Афонин Д.В., Печурин А.С., Яцун С.Ф. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной буксировочной системы воздушных судов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 2. С. 173-183.

## References

1. Kazantseva P. I., Shevtsova N. V. Sovremennye problemy grazhdanskoi aviatsii Rossii. [Modern problems of civil aviation in Russia]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2017, vol. 3, no. 13, pp. 458-459.

2. Maulana R. R., Wibowo S. S. Design and Manufacture of Remote Control Towing Tug for Cessna 172 Aircraft: Structural Analysis. 2021, pp. 525-532.

3. Baaren E., Roling P. C. Design of a zero emission aircraft towing system, *AIAA Aviation*, 2019. *Forum*, 2019, 2932 p.

4. Velikanov A.V., Dyakov D. E., Velikanova L. A., Dyakova N. A. Robotizirovannaya sistema dlya nazemnogo transportirovaniya vozdushnykh sudov [Robotic system for ground transportation of aircraft. *Nauchnyi vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of GosNII GA*, 2021, no.37, pp. 42-52.

5. Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun, S. F. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft]. *Frontiers in Robotics and Electromechanics*, 2023, Springer, pp. 327-339.

6. Yatsun S. F., Bartenev V. V., Politov E. N., Afonin D. V. Modelirovanie dvizheniya robota-tyagacha dlya transportirovki samoletov po aerodromu [Simulation of the movement of a tractor robot for transporting aircraft at the airfield]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no.2(77), pp. 34-43.

7. Binh N. T., Tung N. A., Nam D. P., Quang N. H. An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, vol. 17, pp. 465-473.

8. Sirigu G., Cassaro M., Battipede M., Gili P. A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs. *WSEAS Transactions on Electronics*, 2017, 8, pp. 27-40.

9. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" ER (ZR) 2019, 2020, Kursk, Russia, 2019*, pp. 397-409. Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_32](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_32)

10. Simon J. Autonomous wheeled mobile robot control. *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS*, 2017, no.15(3), pp.222-227.

11. Jardine P. T., Kogan M., Givigi S. N., Yousefi S. Adaptive predictive control of a differential drive robot tuned with reinforcement learning. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2019, no.33(2), p.410-423.

12. Shih C. L., Lin L. C. Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application. *Robotics*, 2017, no.6(3), 17 p.

13. Afonin V. D., Pechurin S. A., Yatsun F. S. Simulation of the Joint Movement of a Robotic-Towing Vehicle and an Aircraft Using Signals from an Optocoupler Matrix. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 63-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>.

14. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application // *19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, IEEE, 2016, pp. 480-483.

15. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 139, pp. 284-293.

16. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82337-82348.

17. Saenz A. et al. Velocity control of an omnidirectional wheeled mobile robot using computed voltage control with visual feedback: Experimental results. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 1089-1102.

18. Efremov K.S., Shestakov V.A. Issledovanie bazovykh manevrov dvizheniya mnogozvennykh kolesnykh robotov [Investigation of basic maneuvers of movement of multi-link wheeled robots]. *Vystavka innovatsii-2020 (vesenniyaya sessiya)* [Innovation Exhibition-2020 (spring session)]. 2020, 69 p.

19. Afonin D.V., Pechurin A.S., Yatsun S.F. Modelirovanie avtonomnogo krivolinейного dvizheniya robotizirovannoi buksirovochnoi sistemy vozdushnykh sudov [Modeling of autonomous curvilinear motion of a robotic towing system of aircraft]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2022, no. 2, pp. 173-183.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Афонин Дмитрий Вячеславович**, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

**Dmitrii V. Afonin**, Post-Graduate Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

**Кочергин Олег Борисович**, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: o-kochergin@bk.ru

**Oleg B. Kochergin**, Student, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: o-kochergin@bk.ru

**Яцун Сергей Фёдорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

**Sergey F. Yatsun**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

## 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 20). 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>.