

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 26 № 2 / 2022



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 26 № 2 / 2022



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadno 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);

Бхаттачарья 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 Рашид 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 29.07.2022.

Дата выхода в свет 28.10.2022 Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 25.

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. Bulychiev, 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 №ФС77-42691 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

© Southwest State University, 2022



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

Singed to print 29.07.2022.

Release date 28.10.2022. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 19.9.

Circulation 1000 copies. Order 25.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой 8**
Балашов С. А., Зезюля В. В., Булычев В. В., Агеева Е. В.

- Разработка макета экспериментальной установки для определения коэффициента жесткости цилиндрических пружин и исследования свободных гармонических колебаний 23**
Политов Е. Н., Рукавицын А. Н., Ломас Арсениега В. П., Теран Акоста Г. Р., Авалос Касканте Ф. Э., Пуэбла Пуэбла Р. Э.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

- Многокритериальная оптимизация проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом 39**
Чуйкин С. В., Куцыгина О. А.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Краткосрочное прогнозирование объемов электропотребления для энергосбытовых компаний на основе интеграции технологий аналитических, имитационных и экспертных систем 53**
Мектепкалиева А.К., Ханова А.А., Аминул Л.Б.

- Исследование интеллектуальных элементов управления мобильным роботом и обеспечение информационной безопасности процесса его функционирования в динамической среде 72**
Макаров М. В., Астафьев А. В., Семенов И. А.

- Моделирование процесса автоматизации создания, проверки и актуализации текста договоров 87**
Котов А.А., Ронжин А.Л.

- Математическое моделирование траекторного управления движением подводного бионического робота-разведчика типа «каракатица» 106**
Лушников Б.В., Трофимов В.В.

- Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности 122**
Андронов В.Г., Чуев А.А., Юдин И.С.

- Метод ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в программно-конфигурируемых сетях 142**
Никишин К. И.

- Увеличение производительности языковых моделей «трансформер» в информационных вопросно-ответных системах 159**
Галеев Д. Т., Панищев В. С., Тимов Д. В.

- К сведению авторов 172**

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Study of Vibration Strength of D16 Aluminum Alloy Joints Welded Applying Resistance Spot Welding 9

Balashov S. A., Zezyulya V. V., Bulychev V. V., Ageeva E. V.

Development of the Layout of the Experimental Setup for Determining the Stiffness Coefficient of Cylindrical Springs and Studying Free Harmonic Oscillations 23

*Polotov E. N., Rukavitsyn A. N., Lomas Arciniega W. P., Terán Acosta G. R.,
Ávalos Cascante F. E., Puebla Puebla R. E.*

CONSTRUCTION

Original articles

Multicriteria Optimization of Design Solutions for Microclimate Systems for Rooms with Artificial Ice 39

Chuykin S. V., Kutsygina O. A.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Short-Term Forecasting of Power Consumption of Power Supply Companies Based on the Integration of Technologies of Analytical, Simulation and Expert Systems 53

Mektepkaliyeva A. K., Khanova A. A., Aminul L. B.

The Study of Intelligent Control Elements of a Mobile Robot and Ensuring Information Security of the Process of Its Functioning in a Dynamic Environment 72

Makarov M. V., Astafiev A. V., Semenov I. A.

Modeling the Automating Process of the Creation, Checking and Updating Texts of Contracts 87

Kotov A. A., Ronzhin A. L.

Mathematical Modelling of the Trajectory Control of the movement of a Cuttlefish-Type Undersea Bionic Reconnaissance Robot 106

Lushnikov B. V., Trofimov V. V.

Methodology for Determining Deviations of Pilotless Aircraft from a Given Trajectory by Parallaxes of Underlying Surface Images 122

Andronov V. G., Chuev A. A., Yudin I. S.

Method for Early Diagnosis of Real-Time Traffic Loss with Timeout Monitoring in Software-Configurable Networks 142

Nikishin K. I.

Increased Performance of Transformers Language Models in Information Question and Response Systems 159

Galeev D. T., Panishchev V. S., Titov D. V.

Information of the authors 172

Исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой

С. А. Балашов¹, В. В. Зезюля¹, В. В. Булычев¹, Е. В. Агеева² ✉

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана
ул. Баженова, д. 2, г. Калуга 248000, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Разработать, провести апробацию методики и выполнить экспериментальное исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой.

Методы. Образцы для испытаний изготавливались из листовых заготовок алюминиевого сплава Д16 толщиной 1 мм посредством контактной точечной сварки. Особенностью предложенной схемы испытаний является реализация симметричного цикла нагружения. В процессе испытаний фиксировалось количество циклов до разрушения в зависимости от размаха колебаний. Для исключения винтового изгиба после вырезки проводился отжиг и термомеханическая правка. После снятия заусенцев и притупления острых кромок проводилась подготовка поверхности заготовок под сварку – химическое травление. Сварка образцов проводилась на машине для точечной сварки ТЕСНА 8214N. Ток сварки составлял 30 кА, продолжительность сварки 0,1 с, усилие на электродах 180 даН. Статическую прочность сварного соединения на срез исследовали на разрывной машине УТС 110М-5 1-У. Усилие разрушения составило 3,66 кН. Особенностью предложенной схемы испытаний является реализация симметричного цикла нагружения. В процессе испытаний фиксировалось количество циклов до разрушения в зависимости от размаха колебаний.

Результаты. В результате статистической обработки результатов исследования получена математическая зависимость линейного вида между логарифмами количеств циклов до разрушения и величиной размаха колебаний. В зависимости от размаха колебаний выявлены характерные зоны разрушения. Для обеспечения возможности сопоставления результатов вибрационной прочности, полученных при различных условиях закрепления образцов, предложено в качестве ординаты использовать размах виброперемещения на единицу длины образца.

Заключение. Предложена и апробирована методика исследования вибрационной прочности соединений, полученных контактной точечной сваркой, в условиях реализации симметричного цикла нагружения. Для исследованных образцов равноправность сварного соединения основному металлу достигается при значении логарифма отношения размаха виброперемещения на единицу длины образца равного 0,01.

Ключевые слова: сварное соединение; контактная точечная сварка; алюминиевые сплавы; вибрационная прочность; схема испытаний.

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

Для цитирования: Исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой / С. А. Балашов, В. В. Зезюля, В. В. Булычев, Е. В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 8-22. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-8-22>.

Поступила в редакцию 24.05.2022

Подписана в печать 15.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Study of Vibration Strength of D16 Aluminum Alloy Joints Welded Applying Resistance Spot Welding

Sergei A. Balashov ¹, Valerii V. Zezyulya ¹, Vsevolod V. Bulychev ¹,
Ekaterina V. Ageeva ² ✉

¹ Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University
2 Bazhenov str., Kaluga 248000, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop and test a technique and perform an experimental study of the vibration strength of D16 aluminum alloy joints welded applying resistance spot welding.

Methods. Test coupons were made from 1 mm thick D16 aluminum alloy sheet blanks applying resistance spot welding. A feature of the proposed test is the implementation of a symmetrical loading cycle. During the tests, the number of cycles to failure depending on the range of vibrations was recorded. Annealing and thermomechanical straightening were carried out to exclude helical bending after cutout. After deburring and root facing, the surface of the coupons was prepared for welding using chemical etching. The coupons were welded using a TECNA 8214N spot welding machine. The welding current was 30 kA, the welding duration was 0.1 s, the electrodes force was 180 daN. The static shear strength of the welded joint was studied using a UTS 110M-5 1-U tensile testing machine. The breaking force was 3.66 kN. The peculiarity of the proposed test is the implementation of a symmetrical loading cycle. During the tests, the number of cycles to failure depending on the range of vibrations was recorded.

Results. As a result of the statistical analysis of the study results, a linear mathematical relationship between the logarithms of the number of cycles to failure and the amplitude of vibrations was obtained. Depending on the range of vibrations, characteristic zones of destruction were revealed. To provide the possibility of comparing the results of vibration obtained under different conditions of fixing the samples, it is proposed to use the range of vibration displacement per unit length of the workpiece as the ordinate.

Conclusion. A technique of studying the vibrational strength of joints welded by resistance spot welding under conditions of a symmetrical loading cycle is proposed and tested. For the studied coupons, the equality of the welded joint to the base metal is achieved at the value of the logarithm of the ratio of the range of vibration displacement per unit length of the coupons equal to 0.01.

Keywords: welded joint; resistance spot welding; aluminum alloys; vibration strength; test sequence.

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

For citation: Balashov S. A., Zezyulya V. V., Bulychev V. V., Ageeva E. V. Study of Vibration Strength of D16 Aluminum Alloy Joints Welded Applying Resistance Spot Welding. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 8-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-8-22>.

Received 24.05.2022

Accepted 15.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Алюминиевые сплавы широко применяются в машиностроении при производстве тонкостенных конструкций различного назначения. Для соединения листовых заготовок наряду с технологиями сварки плавлением достаточно широко применяется контактная точечная сварка. Исследованию особенностей контактной точечной сварки заготовок из алюминиевых сплавов посвящено значительное количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов [1-5]. При этом основным видом оценки прочностных свойств сварных соединений является их статическая прочность на срез и на отрыв [6-8]. Эксплуатационные свойства сварных соединений в условиях знакопеременных нагрузок исследованы гораздо менее полно. В работе [9] исследована усталостная прочность нахлестанных соединений из пластин алюминиевых сплавов толщиной 2 мм при циклическом нагружении на срез при коэффициентах асимметрии цикла нагружения $R=0...0,5$. В работе [10] исследована усталостная прочность на растяжение сварного соединения заготовок из сплава 1565ч толщиной 2 мм. В

данных работах показано, что усталостная прочность соединений зависит от многих параметров режима и условий сварки.

Следует, однако, отметить, что в процессе эксплуатации конструкции из алюминиевых сплавов часто испытывают трудно прогнозируемые виды циклического нагружения, вызванного, например, динамическими нагрузками и вибрацией [11-15]. Для данных видов эксплуатационных нагрузок нагружения результаты циклических испытаний на растяжение в условиях мягкого нагружения [9, 10] оказываются мало информативными для прогнозирования работоспособности сварного соединения. Для исследования работоспособности конструкций в условиях вибрации осуществляются вибрационные испытания, регламентированные такими нормативными документами, как ГОСТ ИСО 10816-1-97, ГОСТ Р 56646-2015, ГОСТ 25.101-83, ГОСТ 28231-89, ГОСТ 33787-2019. Однако методики исследования вибрационной прочности сварных соединений в данных нормативных документах не рассмотрены.

Целью настоящей работы являлась разработка, апробирование методики и экспериментальное исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой.

Материалы и методы

В качестве материала образцов был взят алюминиевый сплав Д16. Образцы изготавливались из листа толщиной 1 мм. Ширина заготовки составляла 20 мм, длина 120 мм. Образцы вырезались на гидравлических листовых ножницах VIMERCATI 2050x8. Для исклю-

чения винтового изгиба после вырезки проводился отжиг и термомеханическая правка. После снятия заусенцев и при- тупления острых кромок проводилась подготовка поверхности заготовок под сварку- химическое травление. Так как интервал времени между окончанием травления и окончанием сварки согласно ОСТ 92-1152-2014 не должен превышать 9 часов, то операции травления и сварки образцов производились в течение одной рабочей смены (8 часов). Сварка образцов (рис.1) проводилась на машине для точечной сварки TECNA 8214N.



Рис. 1. Сварные образцы для испытаний

Fig. 1. Welded test samples

ток сварки составлял 30 кА, продолжительность сварки 0,1 с, усилие на электродах 180 даН. Данные режимы обеспечивают формирование сварного соединения с диаметром сварной точки более 4 мм (рис. 2), что соответствует требованиям ГОСТ 15878-79 для соединений группы А.

Для подтверждения получения в процессе сварки качественного сварного соединения несколько образцов было разрушено скручиванием сварной точки в тисках. Разрушение сварного соединения происходило по основному металлу вокруг сварной точки.

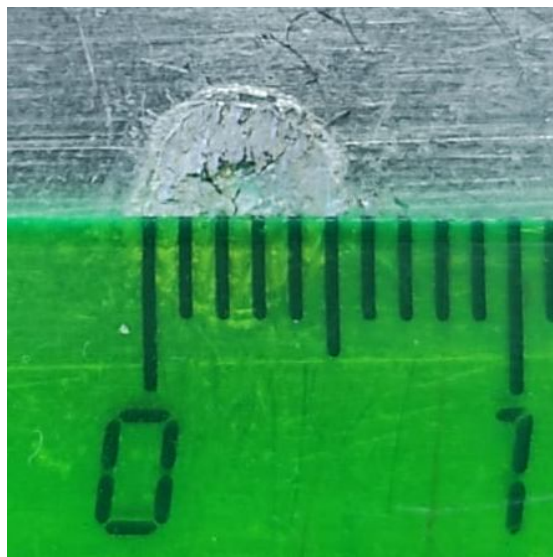


Рис. 2. Разрушенная сварная точка

Fig. 2. Destroyed weld point

Статическую прочность сварного соединения на срез исследовали на разрывной машине УТС 110М-5 1-У. Усилие разрушения составило 3,66 кН. Отсюда напряжение разрушения для сварной точки диаметром 4...5 мм составляет 291...186 МПа. Согласно ГОСТ 21631-76 отожжённый сплав Д16 имеет временное сопротивление при растяжении $\sigma_B = 145...235$ МПа. Согласно ОСТ 92-1114-80 минимально допустимая прочность сварных точек на срез для сплава АМг6 (наиболее близкого по свойствам сплава, приведенного в данном документе) должна составлять 1176 Н. Сказанное свидетельствует о высоких механических свойствах полученных сварных соединений.

Согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97 при вибрационных испытаниях в качестве контролируемых параметров нагружения используются виброперемещение, виброскорость и виброускорение. С

учетом этого при постановке эксперимента по исследованию вибрационной прочности сварных соединений целесообразно принять именно виброперемещение, которое может быть задано как размах колебаний одного закрепления испытываемого образца относительно другого. Частота вибрации составляла 50 Гц. Схема вибрационных испытаний пояснена на рис. 3.

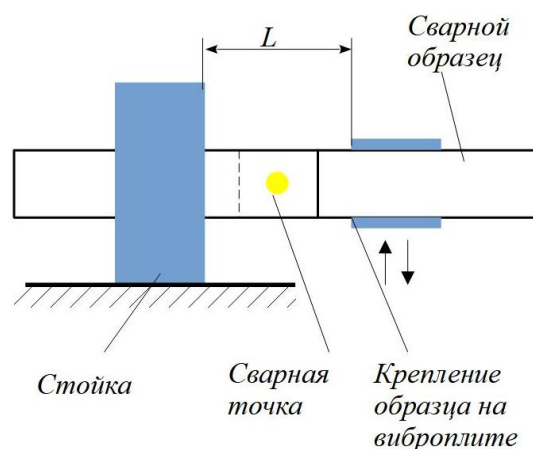


Рис. 3. Схема испытаний вибрационной прочности сварных образцов

Fig. 3. Welded coupons vibration strength testing diagram

Вылет образца между креплениями составлял $L = 40$ мм. Данная схема испытаний позволяет имитировать знакопеременное симметричное нагружение сварного образца, что затруднительно воспроизвести при испытании на растяжение-сжатие из-за потери устойчивости листовых образцов.

Следует отметить, что такой вид испытаний нельзя отнести к усталостным испытаниям с жестким нагружением, т. к. он не позволяет выделить именно пластическую деформацию сварного соединения [16,17]. В то же время сопостав-

ление размаха виброперемещений при испытаниях и зарегистрированных при эксплуатационных нагрузках всей конструкции позволяет сделать более обоснованную оценку работоспособности сварных соединений в условиях воздействий вибрационных нагрузок.

Для испытания образцов был использован вибрационный стенд СВ-2М с

изготовленной оснасткой для крепления образцов (рис. 4). Постановка эксперимента осуществлялась с учетом рекомендаций, приведенных в работах [18, 19].

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний сварных образцов на вибрационную прочность приведены в табл. 1.



Рис. 4. Лабораторная установка для испытаний

Fig. 4. Laboratory testing setup

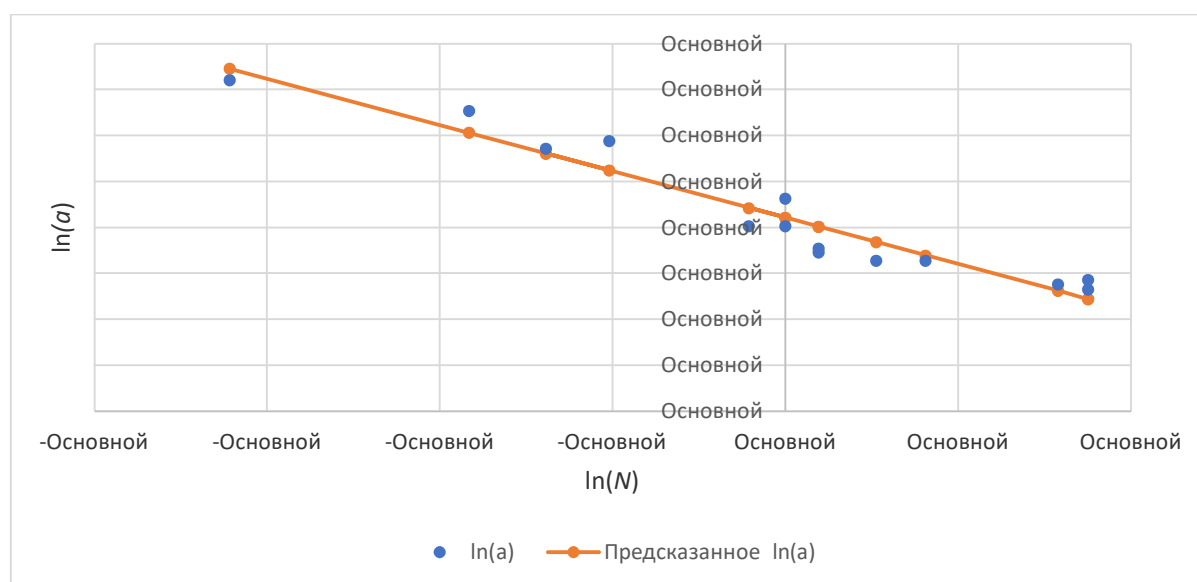
Статистической обработкой данных [20] получили уравнение регрессии $\ln(a) = 8,42 - 4,03 \ln(N)$.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 5.

Образцы 1...12 разрушились по сварной точке (рис. 6, а). Образцы 1...3 и 14 разрушились по основному металлу вне сварного соединения (рис. 6, б).

Таблица 1. Результаты испытаний сварных образцов на вибрационную прочность**Table 1.** Test results of vibration strength of welded coupons

№	Продолжительность испытания, с / Testing time, s	Количество циклов до разрушения N / Num- ber of cycles to failure, N	Амплитуда колебаний a , мм / Vibrations ampli- tude a , mm
1	4	200	2,4
2	6	300	2,4
3	5	250	2,2
4	4	700	1,5
5	14	700	1,3
6	20	1000	1,1
7	24	1200	1,1
8	63	3150	1,0
9	63	3150	0,9
10	212	10600	1,0
11	1860	93000	0,5
12	2580	129000	0,6
13	9420	471000	0,4
14	36240	1812000	0,2

**Рис. 5.** Результаты испытаний на вибрационную прочность**Fig. 5.** Vibration strength test results

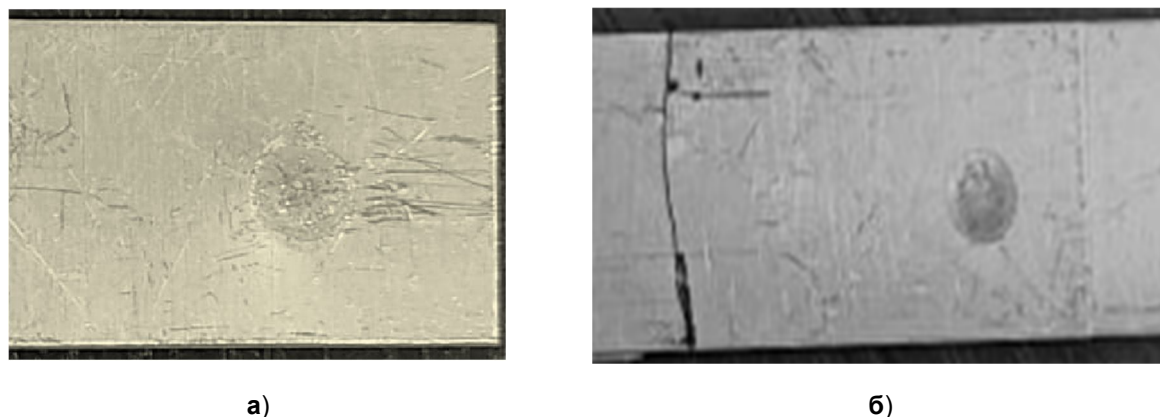


Рис. 6. Виды разрушения сварных образцов при испытании на вибрационную прочность: **а** – разрушение по сварной точке, **б** – разрушение по основному металлу

Fig. 6. Types of destruction of welded coupons during vibration strength testing: **a** – destruction at the welded point, **b** – destruction at the base metal

Коэффициент корреляции составил $r = -0,96$, что свидетельствует о сильной линейной связи между параметрами $\ln(a)$ и $\ln(N)$. Следует также отметить, что статистическая обработка результатов испытаний может быть выполнена без учета зоны разрушения образцов. Разрушение образцов 13 и 14 по основному металлу свидетельствует о том, что при данных размахах колебаний сварная точка перестает быть фактором, определяющим общую вибрационную прочность изделия.

Проведённые исследования позволяют также высказать предположение, требующее более детальной экспериментальной проверки, что при статистической обработке результатов эксперимента в качестве ординаты целесообразно принять параметр $\ln\left(\frac{a}{L}\right)$. В этом случае получили линейную зависимость

$$\ln\left(\frac{a}{L}\right) = -1,75 - 0,23 \ln(N).$$

Параметр $\ln\left(\frac{a}{L}\right)$ характеризует

размах вибрационных колебаний на единицу длины образца, что дает предпосылки для сопоставления результатов испытаний вибрационной прочности образцов, полученных при различных условиях их закрепления.

Проведенные эксперименты показали, что в исследованном случае равноправность сварного соединения основному металлу достигается при размахе вибрационных колебаний $a < 0,4$ мм или при $\frac{a}{L} < 0,01$.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих технологий испытания сварных образцов на вибрационную прочность в различных условиях и состояниях [21-25].

Выводы

1. Предложенная методика испытания сварных образцов на вибрационную прочность может быть реализована на вибрационном стенде СВ-2М и позволяет имитировать знакопеременное симметричное нагружение листового образца с нахлесточным сварным соединением, что затруднительно воспроизвести при испытании на растяжение-сжатие из-за потери устойчивости листовых образцов.

2. В логарифмических координатах выявлена линейная зависимость с хорошей степенью корреляции между ве-

личиной размаха колебаний и числом циклов до разрушения образца.

3. Предложено в качестве ординаты применять отношение размаха колебаний к длине базы, на которой зафиксирован данный размах колебаний, что дает предпосылки для сопоставления результатов испытаний вибрационной прочности образцов, полученных при различных условиях их закрепления. Для исследованных образцов равноправность сварного соединения основному металлу достигается при значении данного параметра менее 0,01.

Список литературы

1. A review on resistance spot welding of aluminum alloys / Sunusi Marwana Manladan, Farazila Yusof, S. Ramesh, Fadzil Jamaludin, Zhen Luo, Sansan Ao. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017.90. P.605–634.

2. Parametric Optimization for Resistance Spot-Welded Thin-Sheet Aluminium Alloy 5052-H32 / Abioye T.E., Anas N.M., Irfan M.K., Anasyida A. S., Zuhailawati H. // Arabian Journal for Science and Engineering. 44. 7617–7626 (2019).

3. Study on the Weld-Bonding Process Optimization and Mechanical Performance of Aluminum Alloy Joints / Mingfeng Li, Yanjun Wang, Zhen Niu, Shanglu Yang // Automotive Innovation. 2020. Vol. 3. P. 221–230.

4. Karimi M.R., Sedighi M., Afshari D. Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 77. No. 5-8. P. 885–895.

5. Астафьева Н. А., Бузин А. С. Исследование влияния видов предварительной обработки на качество сварных облегченных конструкций из алюминиевых сплавов // Вестник ИргТУ. 2018. №7 (138). С.10-18.

6. Parameter optimisation and failure load prediction of resistance spot welding of aluminium alloy 57547 / Đurić A., Klobčar D., Milčić D., Markovic B. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 659 (2019), doi:10.1088/1757-899X/659/1/012042

7. Quantifying structure-property relationships during resistance spot welding of an aluminum 6061-T6 joint / Turnage S., Darling K., Rajagopalan M., Whittington W., Tschopp M., Peralta P., Solanki K. // arXiv preprint arXiv:160504251, 2016.

8. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Ключков Г.Г. Исследование свойств сварных соединений алюминиевого сплава В1341, выполненных контактной точечной сваркой // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 7. С. 8-12.

9. Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy / Florea R.S., Bammann D.J., Yeldell A., Solanki K.N., Hammi Y. // Materials and Design. 2013. Vol. 45. P. 456-465.

10. Андреева Л.П., Овчинников В.В., Сидоров А.А. Оптимизация размеров точечных соединений при электроконтактной сварке алюминиевых сплавов // Современные материалы, техника и технологии. 2015. №3. С. 23-32.

11. Зарецкий М.В., Сидоренко А. С. Напряженное состояние авиационной конструкции со сварными соединениями при случайных колебаниях // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №12. С. 476-482.

12. Власова Е. Е., Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Долговечность авиационной конструкции со сварными соединениями при случайном нагружении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №9. С. 376-389.

13. Герасимов О.Н., Доросинский А.Ю., Березин М.Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. 2017. №3 (19). С. 37-42.

14. Особенности проверки изделий ракетно-космической техники на вибропрочность / М.А. Зайцев, Д.В. Остапенко, Д.С. Швецова, Т.А. Королева, Журавлев В.Ю. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. № 14. С. 189-191.

15. Развитие экспериментальной базы прочностных исследований ЦИАМ / Ю.А. Ножницкий, Б.А. Балувев, Ю.А. Федина, Д.В. Шадрин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2019. № 57. С. 55-69.

16. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4 (21). С.35-40.

17. Мыльников В. В. Кондрашкин О. Б., Шетулов Д. И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. 177 с.

18. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 354 с.

19. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник. М.: Металлургия, 1978. 302 с.

20. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2011. 287 с.
21. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7. № 2 (23). С. 6-15.
22. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.
23. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.
24. Триботехнические характеристики композиционных покрытий с матрицей из полигетероарилена пм-дадфэ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при трении скольжения в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3 (66). С. 17-28.
25. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочнённых углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х / А.Д. Бреки, Т.С. Кольцова, А.Н. Скворцова, О.В. Толочко, С.Е. Александров, А.А. Лисенков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 11-23.

References

1. Sunusi Marwana Manladan, Farazila Yusof, S. Ramesh, Fadzil Jamaludin, Zhen Luo, Sansan Ao. A review on resistance spot welding of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90, pp.605–634.
2. Abioye T.E., Anas N.M., Irfan M.K., Anasyida A. S., Zuhailawati H. Parametric Optimization for Resistance Spot-Welded Thin-Sheet Aluminum Alloy 5052-H32. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 44. 7617–7626 (2019).

3. Mingfeng Li, Yanjun Wang, Zhen Niu, Shanglu Yang. Study on the Weld-Bonding Process Optimization and Mechanical Performance of Aluminum Alloy Joints. *Automotive Innovation*, 2020, vol. 3, pp.221–230.

4. Karimi M.R., Sedighi M., Afshari D. Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, no. 5-8, pp. 885–895.

5. Astafyeva N. A., Buzin A. S. Issledovanie vliyaniya vidov predvaritel'noi obrabotki na kachestvo svarnykh oblegchennykh konstruktssii iz alyuminievykh splavov [Investigation of the influence of types of pretreatment on the quality of welded lightweight structures made of aluminum alloys]. *Vestnik IrGTU = Bulletin of IrSTU*, 2018, no.7 (138), pp.10-18.

6. Đurić A., Klobčar D., Milčić D., Markovic B. Parameter optimization and failure load prediction of resistance spot welding of aluminum alloy 57547. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 659* (2019), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012042>

7. Turnage S., Darling K., Rajagopalan M., Whittington W., Tschopp M., Peralta P., Solanki K. Quantifying structure-property relationships during resistance spot welding of an aluminum 6061-T6 joint. arXiv preprint arXiv:160504251, 2016.

8. Gureeva M.A., Grushko O.E., Klochkov G.G. Issledovanie svoistv svarnykh soedinenii alyuminievogo splava V1341, vypolnennykh kontaktnoi tochechnoi svarkoi [Investigation of the properties of welded joints of aluminum alloy B1341 made by contact spot welding]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Procurement production in mechanical engineering*, 2016, no. 7, pp. 8-12.

9. Florea R.S., Bammann D.J., Yeldell A., Solanki K.N., Hammi Y. Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy. *Materials and Design*, 2013, vol. 45, pp. 456-465.

10. Andreeva L.P., Ovchinnikov V.V., Sidorov A.A. Optimizatsiya razmerov tochechnykh soedinenii pri elektrokontaktnoi svarke alyuminievykh splavov [Optimization of the sizes of point joints during electric contact welding of aluminum alloys]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2015, no.3, pp. 23-32.

11. Zaretsky M.V., Sidorenko A. S. Napryazhennoe sostoyanie aviatsionnoi konstruktssii so svarnymi soedineniyami pri sluchainykh kolebaniyakh [The stressed state of an aircraft structure with welded joints at random fluctuations]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya TulsU. Technical Sciences*, 2018, no.12, pp. 476-482.

12. Vlasova E. E., Zaretsky M.V., Sidorenko A.S. Dolgovechnost' aviatsionnoi konstruktssii so svarnymi soedineniyami pri sluchainom nagruzhении [Durability of an aircraft

structure with welded joints under random loading]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya TulSU. Technical Sciences*, 2019, no.9, pp. 376-389.

13. Gerasimov O.N., Dorosinsky A.Yu., Berezin M.N. Issledovanie vliyaniya vozdeistviya vibratsionnykh nagruzok na konstruktsionnye materialy izdelii elektronnoi tekhniki [Investigation of the impact of vibration loads on structural materials of electronic equipment products]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex Systems*, 2017, no.3 (19), pp. 37-42.

14. Zaitsev M.A., Ostapenko D.V., Shvetsova D.S., Koroleva T.A., Zhuravlev V.Yu. Osobennosti proverki izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki na vibro-prochnost' [Features of testing rocket and space technology products for vibration resistance]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2018, vol. 1, no. 14, pp. 189-191.

15. Scissors Yu.A., Baluyev B.A., Fedina Yu.A., Shadrin D.V. Razvitie eksperimental'noi bazy prochnostnykh issledovaniy TsIAM [Development of the experimental base of strength studies of CIAM]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering*, 2019, no. 57, pp. 55-69.

16. Erasov V.S., Nuzhny G.A. Zhestkii tsikl nagruzheniya pri ustalostnykh ispytaniyakh [Rigid loading cycle during fatigue tests]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2011, no.4 (21), pp.35-40.

17. Mylnikov V. V. Kondrashkin O. B., Shetulov D. I. *Tsiklicheskaya prochnost' i dolgovechnost' konstruktsionnykh materialov* [Cyclic strength and durability of structural materials]. N. Novgorod, NNGASU Publ., 2018, 177 p.

18. Kogaev V.P. *Raschet na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Calculation of strength under stresses, variables in time]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 354 p.

19. Shkolnik L.M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy* [Methods of fatigue tests]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978, 302 p.

20. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2011, 287 p.

21. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tikhonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E.V. Perspektivnye stali dlya kozhukhov domennykh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2017, vol. 7, no. 2 (23), pp. 6-15.

22. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Skotnikova M.A., Fadin Yu.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev A.N., Ageev E.V. Issledovanie protivoznosnykh svoystv plastichnogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala, sodержashchego dispersnye chastitsy sloistogo modifikatora treniya [Investigation of antiwear properties of a plastic lubricating composite material containing dispersed particles of a layered friction modifier]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (64), pp. 75-82.

23. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Sergeev N.N., Ageev E.V., Sergeev A.N., Maliy D.V., Provotorov D.A. Tribotekhnicheskie svoystva plastichnykh smazochnykh kompozitsionnykh materialov s napolnitelyami iz dispersnykh chastits medi i tsinka [Tribotechnical properties of plastic lubricating composite materials with fillers from dispersed particles of copper and zinc]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 2 (65), pp. 109-119.

24. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Fadin Yu.A., Starikov N.E., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Ageev E.V., Provotorov D.A. Tribotekhnicheskie kharakteristiki kompozitsionnykh pokrytii s matritsei iz poligeteroarilena pm-dadfe i napolnitelyami iz nanochastits dikhal'kogenidov vol'frama pri trenii skol'zheniya v srede zhidkogo smazochnogo materiala [Tribotechnical characteristics of composite coatings with a matrix of polyheteroarylene pm-dadfe and fillers of tungsten dichalcogenide nanoparticles during sliding friction in a liquid lubricant medium]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 3 (66), pp. 17-28.

25. Breki A.D., Koltsova T.S., Skvortsova A.N., Tolochko O.V., Alexandrov S.E., Lisenkov A.A., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Maliy D.V., Sergeev A.N., Ageev E.V., Gvozdev A.E. Antifriktsionnye svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove alyuminiya, uprochnennykh uglerodnymi nanovoloknami, pri trenii po stali 12Kh [Antifriction properties of composite materials based on aluminum reinforced with carbon nanofibers during friction on 12X steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 4 (21), pp. 11-23.

Информация об авторах / Information about the Authors

Балашов Сергей Александрович, аспирант кафедры колесных машин и прикладной механики, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: balashovsa@student.bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6729-9850>

Sergey A. Balashov, Post-Graduate Student of the Department of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation, e-mail: balashovsa@student.bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6729-9850>

Зезюля Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры колесных машин и прикладной механики, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: zezyulya-valera@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7442-5608>

Valery V. Zezyulya, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation, e-mail: zezyulya-valera@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7442-5608>

Булывчев Всеволод Валериевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой колесных машин и прикладной механики, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: vs.bulychev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8250-7088>

Vsevolod V. Bulychev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation, e-mail: vs.bulychev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8250-7088>

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>

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

Разработка макета экспериментальной установки для определения коэффициента жесткости цилиндрических пружин и исследования свободных гармонических колебаний

Е. Н. Политов ¹, А. Н. Рукавицын ¹✉, В. П. Ломас Арсиниега ²,
Г. Р. Теран Акоста ², Ф. Э. Авалос Касканте ², Р. Э. Пуэбла Пуэбла ²

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

² Центральный университет Эквадора
г. Кито, Республика Эквадор

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка макета экспериментальной установки, позволяющей проводить исследования с упругими элементами путем осуществления силового воздействия на них, а также автоматического сбора данных и их анализа, который позволяет определять коэффициент жесткости и исследовать простые гармонические колебания.

Методы. Разработанное устройство позволяет определять коэффициент упругости пружины двумя методами – статическим и динамическим. Динамический метод требует строгого соблюдения определенной методики экспериментальных исследований. При этом исследуемая система находится под действием восстанавливающей силы, прямо пропорциональной смещению, т.е. она представляет собой простой генератор гармонических колебаний. Создаваемый прототип экспериментальной установки включает в себя несущую конструкцию, систему управления, к которой подключен ультразвуковой датчик измерения расстояния, и специальное мобильное приложение, позволяющее визуализировать и записывать результаты проведенных измерений в удобной для пользователя форме.

Результаты. Разработанный прототип позволяет определить деформацию пружины статическим и динамическим методами, а наличие специального мобильного приложения для устройств с операционной системой "Android" позволяет пользователю управлять устройством со своего мобильного телефона. Экспериментальное устройство позволяет визуализировать графически полученные данные и осуществляет их экспорт в файл переменных значений. Экспортированные показатели выводятся в табличной форме для последующей обработки с помощью статистических инструментов или приложений для численных вычислений.

Заключение. Повышение качества образовательного процесса студентов-физиков требует широкого внедрения в учебный процесс специального оборудования для проведения экспериментальных исследований. Специфика такого оборудования может охватывать различные разделы механики, в том числе кинематику, колебательное движение, удар, упругость и т. п.

Ключевые слова: упругость; свободные гармонические колебания; коэффициент жесткости.

© Политов Е. Н., Рукавицын А. Н., Ломас Арсиниега В. П., Теран Акоста Г. Р., Авалос Касканте Ф. Э., Пуэбла Пуэбла Р. Э., 2022

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

Для цитирования: Разработка макета экспериментальной установки для определения коэффициента жесткости цилиндрических пружин и исследования свободных гармонических колебаний / Е. Н. Политов, А. Н. Рукавицын, В. П. Ломас Арсиниега, Г. Р. Теран Акоста, Ф. Э. Авалос Касканте, Р. Э. Пуэбла Пуэбла // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 23-38. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-23-38>.

Поступила в редакцию 20.04.2022

Подписана в печать 02.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Development of the Layout of the Experimental Setup for Determining the Stiffness Coefficient of Cylindrical Springs and Studying Free Harmonic Oscillations

Evgeny N. Politov ¹, Alexander N. Rukavitsyn ¹ ✉, Lomas Arciniega Washington
Patricio ², Terán Acosta Guillermo Rubén ², Ávalos Cascante Fausto Eduardo ²,
Puebla Puebla Raúl Eduardo ²

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Central University of Ecuador
Quito, Republic of Ecuador

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

Abstract

Purpose of research. is to develop a layout of an experimental setup that allows conducting research with elastic elements by exercising a force impact on them as well as automatic data collection and analysis, which allows determining the stiffness coefficient and investigating simple harmonic oscillations.

Methods. The developed device makes it possible to determine elasticity coefficient of the spring applying two methods - static and dynamic. The dynamic method requires strict adherence to a certain procedure of experimental study. In this case, the system under study is under the action of a restoring force directly proportional to the displacement, i.e. it is a simple generator of harmonic oscillations. The prototype of the experimental setup being created includes a supporting structure, a control system to which an ultrasonic distance measurement sensor is connected, and a special mobile application that allows visualizing and recording the results of measurements in a user-friendly form.

Results. The developed prototype makes it possible to determine spring deformation by static and dynamic methods; the presence of a special mobile application for devices with the Android operating system allows the user to control the device from his mobile phone. The experimental device allows visualizing the obtained data graphically and export them to a file of variable values. Exported values are displayed in tabular form for further processing using statistical tools or numerical computing applications.

Conclusion. To improve the quality of the educational and training process of physics students it is necessary to introduce special equipment for experimental research into the educational process. Such equipment can be applied in the studies conducted in various sections of mechanics, including kinematics, oscillatory motion, impact, elasticity, etc.

Keywords: elasticity; free harmonic oscillations; stiffness coefficient.

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

For citation: Politov E. N., Rukavitsyn A. N., Lomas Arciniega W. P., Terán Acosta G. R., Ávalos Cascante F. E., Puebla Puebla R. E. Development of the Layout of the Experimental Setup for Determining the Stiffness Coefficient of Cylindrical Springs and Studying Free Harmonic Oscillations. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 23-38 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-2-23-38](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-23-38).

Received 20.04.2022

Accepted 02.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Разрабатываемое устройство является прототипом одного из многочисленных измерительных стендов, которые были разработаны в рамках проекта по созданию и внедрению в образовательный процесс экспериментальных установок, необходимых при изучении научно-естественных дисциплин в Центре Физики UCE (г. Кито, Эквадор). Подобные измерительные стенды позволяют продемонстрировать физические законы и принципы на основе натурных экспериментов. Такие устройства обязательно содержат технологический компонент, который позволяет с помощью специальных датчиков измерять необходимые величины с последующей их интерпретацией в удобном для пользователя виде с целью анализа и исследования интересующих законов и принципов [1-5].

Устройство позволяет наглядно продемонстрировать действие закона Гука, а также исследовать гармонические колебания и определить коэффициент жесткости пружины. Исследуемый объект под воздействием внешних сил может претерпевать изменения размеров и

формы, которые напрямую зависят от типа материала, из которого он изготовлен. Экспериментальное исследование пружин заключается в том, что их подвергают растяжению или сжатию при воздействии на них внешних силовых факторов [6]. Так при подвешивании груза к пружине, она растягивается, поскольку на нее оказывается силовое воздействие. При увеличении массы груза наблюдается пропорциональное увеличение растяжения пружины, из чего следует, что растяжение прямо пропорционально величине приложенной силы (закон Гука) [6]. Исследуемая пружина соответствует данному закону только в своем рабочем диапазоне.

При растяжении или сжатии вдоль оси симметрии (рис. 1), сила упругости направлена в сторону, противоположную действию сил, вызывающих ее деформацию, и может быть определена по формуле [7]:

$$\vec{F}_{el} = -k \cdot \Delta l \cdot \vec{\mu}_l, \quad (1)$$

где Δl – абсолютное удлинение пружины l_0 , м;

k – коэффициент упругости пружины, Н/м.

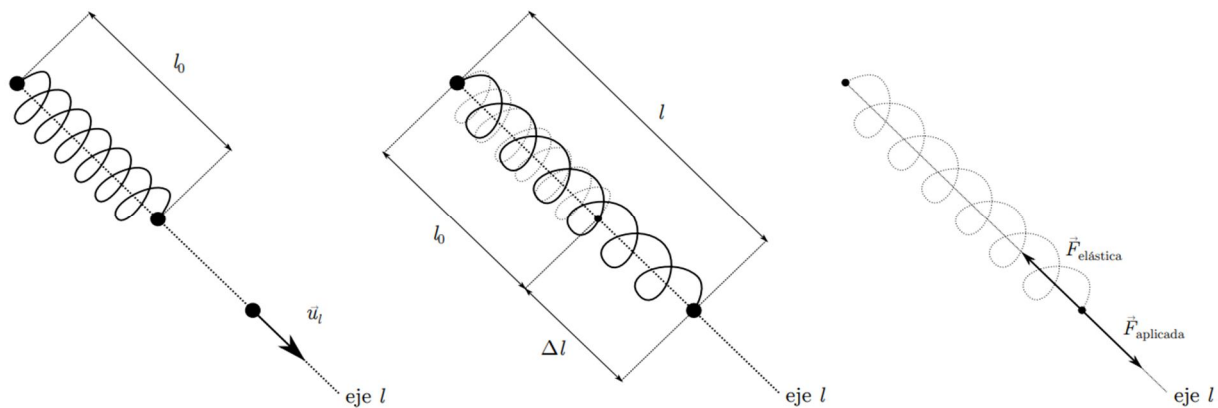


Рис. 1. Диаграмма изменения длины пружины в условиях действия закона Гука

Fig. 1. Diagram of the change in the spring length under the conditions of Hooke's law

Материалы и методы

Разработанное устройство позволяет определять коэффициент упругости пружины двумя методами.

Статический метод. При использовании данного метода пружину подвешивают вертикально, а к ее свободному концу подвешивают груз известной массы, как показано на рис. 2. При этом величина приложенной нагрузки, которая является результатом действия веса подвешенного груза, определяется уравнением [8]:

$$P=mg, \quad (2)$$

где mg – сила тяжести, которая вызывает растяжение пружины на величину d .

После выполнения данной операции переходят к вычислению коэффициента жесткости пружины из уравнения для закона Гука [3].

Динамический метод. При использовании динамического метода, учитывая, что рассматриваемая система находится под действием восстанавли-

вающей силы, прямо пропорциональной смещению, то она рассматривается как генератор простых гармонических колебаний. Уравнение свободных гармонических колебаний имеет вид [8]:

$$x(t)=A \cos (\omega t+\varphi), \quad (3)$$

где A – амплитуда колебаний, т.е. максимальное смещение относительно начального положения равновесия;

ω – угловая скорость;

φ – сдвиг фаз.

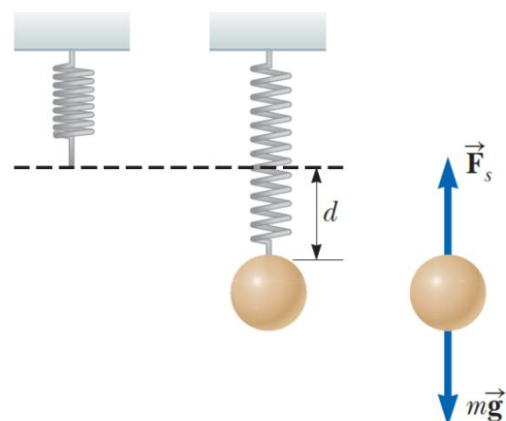


Рис. 2. Определение коэффициента жесткости пружины статическим методом

Fig. 2. Determination of the spring stiffness coefficient by the static method

График движения груза в зависимости от времени показан на рис. 3.

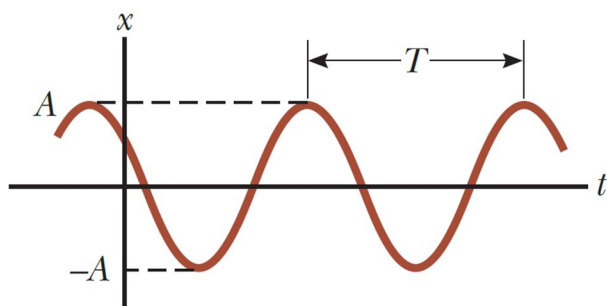


Рис. 3. График свободных гармонических колебаний

Fig. 3. The diagram of free harmonic oscillations

Период колебаний груза задается уравнением [8]:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (4)$$

где m – масса, приложенная к свободному концу пружины;

k – коэффициент упругости пружины.

Использование динамического метода требует строгого соблюдения определенной методики экспериментальных исследований, а именно пружину устанавливают вертикально, а на ее свободный конец помещают груз известной массы. Пружину растягивают, прикладывая к ней дополнительное усилие руками, после чего отпускают. Важно убедиться, что движение груза происходит только вдоль вертикальной оси, полностью исключив колебания в горизонтальной плоскости [7,9-11]. Далее переходят к измерению периода колебаний рассматриваемой системы.

Разработанный прототип экспериментальной установки (рис. 4) включает в себя несущую конструкцию, систему

управления, к который подключен ультразвуковой датчик измерения расстояния, и специальное мобильное приложение, позволяющее визуализировать и записывать результаты проведенных измерений в удобной для пользователя форме.

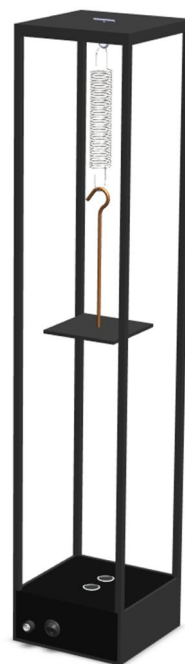


Рис. 4. Прототип экспериментальной установки для измерения жесткости пружин и исследования простых гармонических колебаний

Fig. 4. The prototype of the experimental setup for measuring spring stiffness and studying simple harmonic oscillations

Несущая конструкция оснащена устройством для установки и закрепления пружин различной длины и жесткости, и механизмом для подвешивания грузов на свободном конце пружины, что позволяет проводить разнонаправленные исследования, в том числе и определять коэффициент жесткости пружины, используемой для анализа. Конструкция

прототипа изготовлена из достаточно прочного материала и способна выдерживать нагрузки, создаваемые исследуемой системой «пружина-груз». При этом при проведении эксперимента особенно важно, чтобы конструкция не подвергалась деформации при установке максимально допустимого веса груза. Размеры прототипа экспериментальной установки составляют (110×110×550) мм, а размер сечения вертикальных стержней – (6×6) мм. Выбранный материал – алюминиевый сплав 6063-T5 обладает легкостью, что позволяет легко транспортировать экспериментальную установку.

Чтобы убедиться, что разработанная конструкция соответствует предъявляемым к ней требованиям, с по-

мощью программы имитационного моделирования Solidworks Simulation был проведен анализ нагрузочной способности, а также возможных деформаций, наблюдаемых в конструкции прототипа. При моделировании нагрузка задавалась в виде сосредоточенной силы в 20 Н, которая была приложена к устройству для установки и закрепления пружины. Данное значение соответствует максимально допустимому.

Полученные результаты моделирования (рис. 5) позволяют утверждать, что величина максимальной деформации, которая наблюдается в вертикальных стержнях несущей конструкции, составляет 0.002773 мм, что дает возможность сделать вывод о правильности выбранного материала.

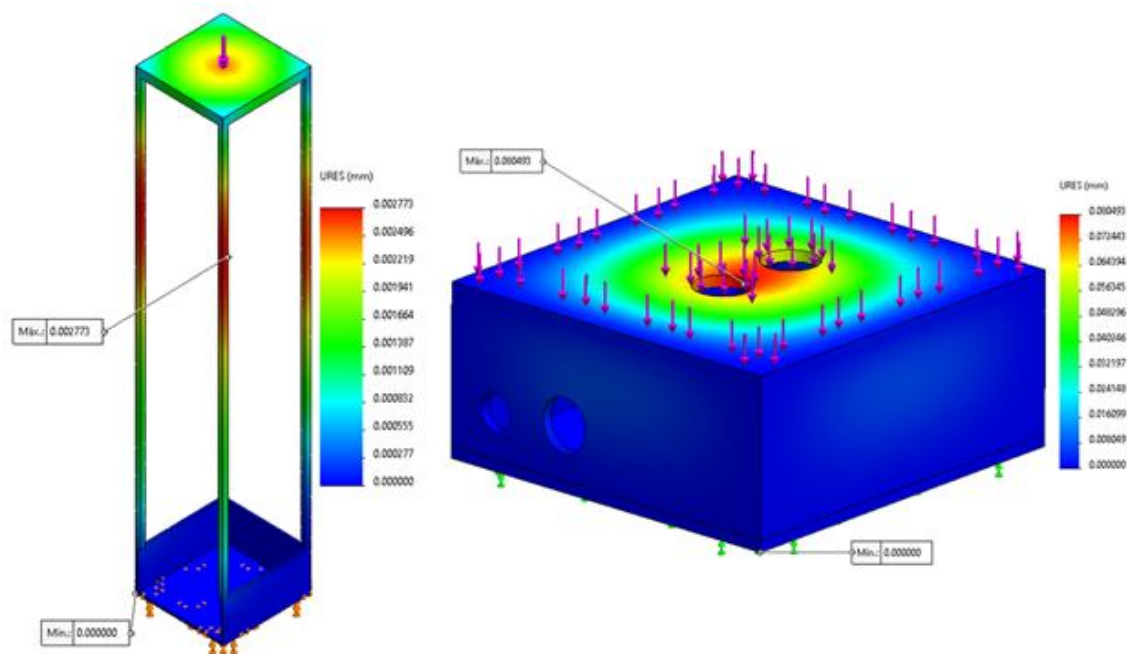


Рис. 5. Анализ деформации несущей конструкции и корпуса системы управления прототипа экспериментальной установки

Fig. 5. Analysis of the deformation of the supporting structure and the control system casing of the experimental installation prototype

Система управления и датчик измерения расстояния расположены внутри изготовленного из АБС-пластика корпуса, который крепится к нижней части несущей конструкции экспериментальной установки. Размеры корпуса составляют (104×107×45) мм. При определении нагрузочной способности корпуса считалось, что на его поверхность сверху действует равномерно распределенная нагрузка, являющаяся результатом воздействия учтенного ранее силового воздействия в 20Н. Величина максимальной деформации не превышает 0,080493 мм.

Для определения положения механизма для подвешивания грузов относительно нулевого уровня, который настраивается с помощью мобильного приложения, используется ультразвуковой датчик HC-SR04 (рис. 6), который позволяет измерять расстояние без непосредственного контакта с элементами экспериментальной системы. Данный датчик для определения расстояния использует ультразвуковой сигнал и имеет следующие характеристики [12]:

- диапазон измерений от 2 до 450 см;
- рабочее напряжение 5В постоянного тока;
- рабочий ток 15 мА;
- габаритные размеры (45×20×15) мм.

Система управления прототипом экспериментальной установки построена на плате Arduino Nano, которая характеризуется низким энергопотреблением, имеет относительно не большие размеры и напряжение питания 5В

постоянного тока. Плата имеет два вывода для сбора данных, поступающих с датчика обратной связи, и отправки их в мобильное приложение при наличии последовательной связи на основе использования соответствующих выводов [13]. Для передачи данных используется модуль Bluetooth HC06.



Рис. 6. Ультразвуковой датчик HC-SR04

Fig. 6. HC-SR04 ultrasonic sensor

Используемое специальное мобильное приложение, разработанное для устройств Android, имеет элементы управления, необходимые для подключения по каналу Bluetooth к прототипу экспериментальной установки. Приложение позволяет отображать данные о движении груза в режиме реального времени. Связь с пользовательским интерфейсом осуществляется через кнопку, которая позволяет изменять уровень исследуемого параметра, что дает возможность исследовать простые гармонические колебания, создаваемые системой «пружина-груз», как показано на рис. 7.

Функциональные возможности приложения включают в себя запись данных, которые могут быть экспортиро-

ваны в файл переменных, с точностью до 10^{-6} , что дает возможность их дальнейшей обработки с помощью любого программного пакета выполнения вычислительных операций.

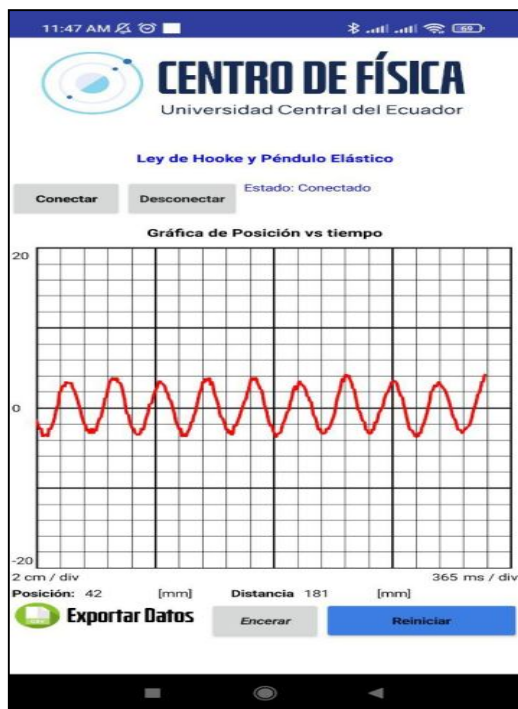


Рис. 7. Пользовательский интерфейс мобильного приложения прототипа исследовательской установки

Fig. 7. User interface of the mobile application of the experimental setup prototype

В данной работе использовался специализированный пакет программ Matlab.

Результаты и их обсуждение

При проведении статических исследований использовалась методика, представленная выше. С помощью мобильного приложения измерялись конечные положения, которых достигает анализируемая система, что дает возможность количественно оценить изменения длины пружины как в свободном, так и в нагруженном состоянии [14-18]. При этом использовались грузы массой 50, 100 и 150 г. Для каждого эксперимента выполнялось несколько измерений и определялось среднее значение. Полученные данные представлены в табл. 1. За начало отсчета принята нижняя точка пружины, длина которой в свободном состоянии составляет 243.6 мм, а коэффициент жесткости 9 Н/м [19].

Таблица 1. Данные, полученные статическим методом

Table 1. Data obtained by the static method

m	F	y_f						Δy	$-F/\Delta y$	$E(\%)$
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\bar{y}$			
(kg)	(N)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N/m)	
0.00	0.00	243.0	244.0	244.0	243.0	244.0	243.6	0.00	-	-
0.05	0.49	197.0	193.0	198.0	199.0	197.0	196.8	-46.80	10.47	16.33
0.10	0.98	141.0	137.0	142.0	141.0	141.0	140.4	-103.20	9.50	5.51
0.15	1.47	81.0	81.0	80.0	80.0	78.0	80.0	-163.60	8.99	0.16
0.15	1.47	81.0	79.0	80.0	81.0	78.0	79.8	-163.80	8.97	0.28
0.10	0.98	137.0	139.0	142.0	137.0	142.0	139.4	-104.20	9.40	4.50
0.05	0.49	196.0	193.0	196.0	197.0	197.0	195.8	-47.80	10.25	13.90
0.00	0.00	243.0	243.0	244.0	243.0	247.0	244.0	0.40	-	-

При проведении данного исследования, при использовании грузов массой 50 г, отклонения от заданного значения при определении коэффициента упругости превышало 10%, в то время, как при использовании груза массой 150 г величина ошибки не превышала 2% (см. табл. 1).

Для динамического анализа использовался груз массой 100 г, а с учетом массы механизма для подвешивания грузов (12 г), общая нагрузка составля-

ла 112 г. Анализ проводился для двух значений амплитуды гармонических колебаний (30 и 40 мм соответственно). Частотно-спектральный анализ данных проводился с помощью быстрого преобразования Фурье, что дало возможность получить графики простых гармонических колебаний и установить основные параметры колебательного процесса [1]. Полученные с помощью мобильного приложения результаты исследования представлены на рис. 8-11.

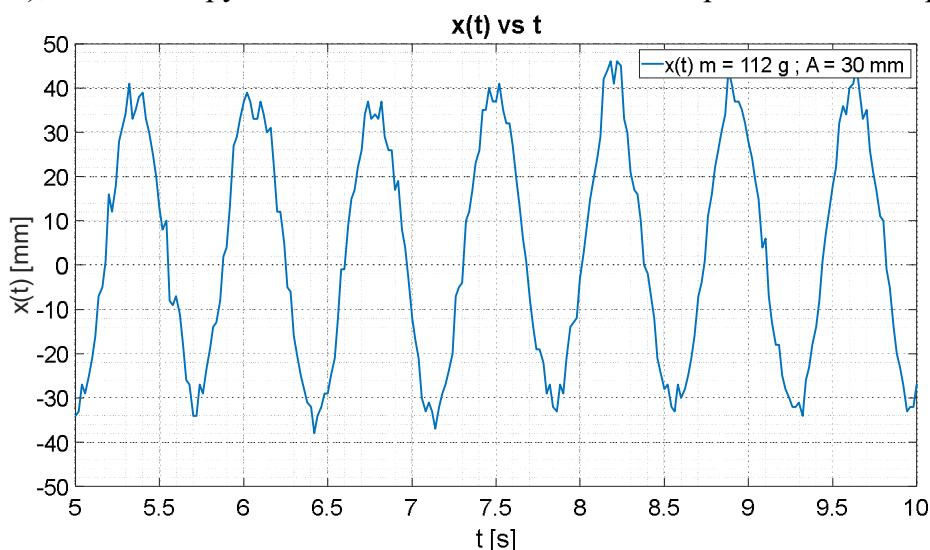


Рис. 8. График свободных гармонических колебаний ($A=30$ мм)

Fig. 8. The diagram of free harmonic oscillations ($A = 30$ mm)

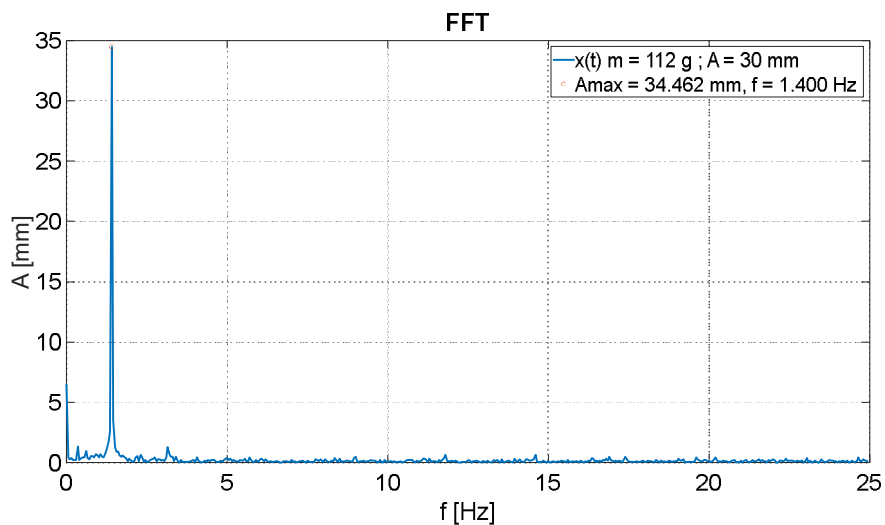


Рис. 9. АЧХ колебательного процесса ($A=30$ мм)

Fig. 9. Frequency response of the oscillatory process ($A = 30$ mm)

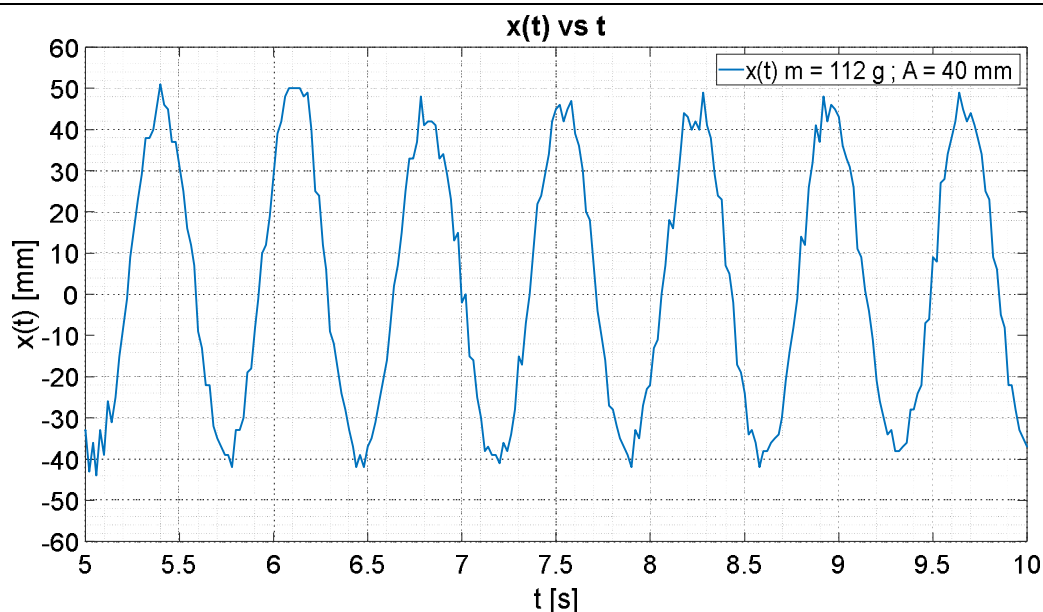


Рис. 10. График свободных гармонических колебаний ($A=40$ мм)

Fig. 10. The diagram of free harmonic oscillations ($A = 40$ mm)

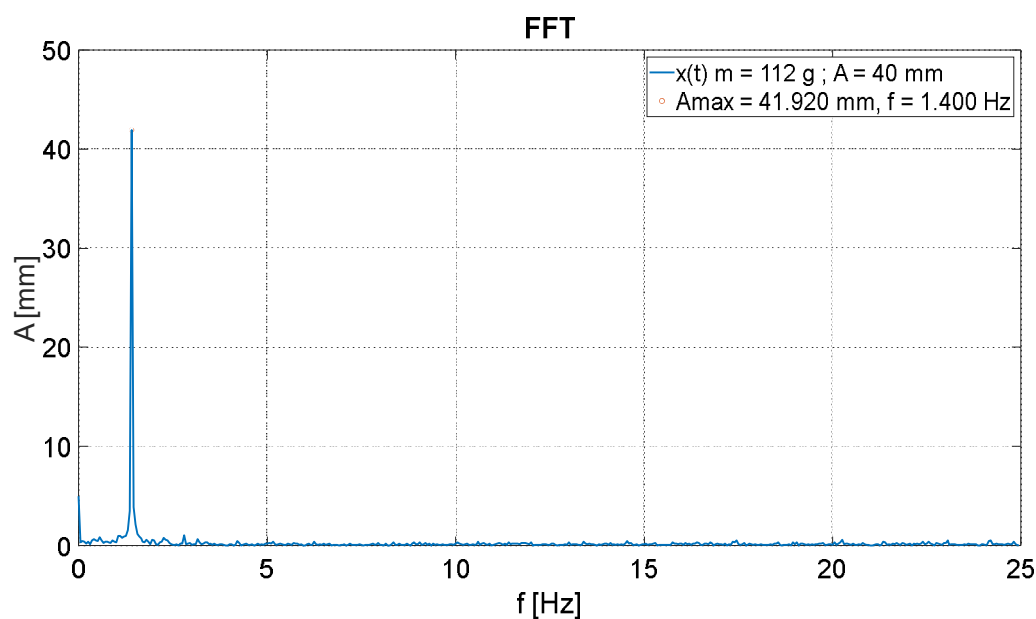


Рис. 11. АЧХ колебательного процесса ($A=40$ мм)

Fig. 11. Frequency response of the oscillatory process ($A = 40$ mm)

Анализ представленных результатов дает возможность определить собственную частоту ($f=1,4$ Гц) для обоих значений амплитуд, а также период колебаний, который напрямую не зависит от массы установленного груза, и коэффициент жесткости пружины. Полученная при

спектральном анализе амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебательного процесса позволяет установить зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты [21,22]. Установлено, что при обоих значениях амплитуд собственная частота состав-

ляет 1,4 Гц, а период свободных гармонических колебаний 0.7143с. Определение на основе динамического метода исследований в соответствии с уравнением (4) коэффициента жесткости пружины, при массе подвешенного груза 112 г дает значение 8,67 Н/м, что дает ошибку в 3,6%. Это позволяет говорить о достаточно высокой точности данного метода.

Выводы

Разработанный макет предназначен для проведения экспериментальных исследований и позволяет, используя закон Гука, определять коэффициент жесткости пружин [23] как на основе статического, так и динамического методов, а также исследовать свободные гармонические колебания.

Использование статического метода определения коэффициента жесткости

пружины при нагрузках менее 50 г дает существенные погрешности (более 10%), что требует проведения экспериментов при больших нагрузочных массах.

Применение динамического метода, с последующим выполнением частотно-спектрального анализа полученных данных, позволяет установить основные параметры свободных гармонических колебаний, в том числе и коэффициент жесткости с минимальной погрешностью (не более 3,6 %).

Представленное оборудование упрощает проведение экспериментальных исследований, автоматически обеспечивая регистрацию данных для последующей обработки с помощью специального программного обеспечения. Данное оборудование имеет низкую стоимость и легко воспроизводится.

Список литературы

1. Палочкин С.В., Кошкин А.В. Экспериментальное определение коэффициентов поглощения тарельчатых пружин // Современные проблемы теории машин. 2017. № 5. С. 45-48.
2. Пат.170853 Российская Федерация МПК U1, Устройство для демонстрации и исследования свободных колебаний физического маятника / В.В. Дубинин, В.В. Витушкин, № 2016150472, заявл. 21.12.2016; опубл. 11.05.2017
3. Мижидон А.Д., Баргуев С.Г. О собственных колебаниях механической системы каскадного типа, установленной на упругом стержне // Вестник ВСГТУ. 2010. № 1. С. 26-32.
4. Нелинейные колебания механических систем с одной и двумя степенями свободы / Д.А. Гришко, В.В. Лапшин, Е.С. Студенников, А.Н. Тарасенко, В.В. Леонов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 6 (78). С. 2.
5. Пирогов С.П., Чуба А.Ю. Экспериментальные исследования собственных частот колебаний трубчатых манометрических пружин // Проблемы эксплуатации си-

стем транспорта: сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, посвященной 45-летию со дня основания Тюменского индустриального института им. Ленинского комсомола. Тюмень, 2008. С. 243-245.

6. Хьюитт П. Концептуальная Физика. Мексика: Из-во «Общественное образование в Мексике», 2016. 816 с.

7. Alonso V. Determinación de la constante elástica de un muelle por dos métodos: Estático y Dinámico : Repositorio Documental // Universidad de Valladolid. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/30838/ Practica%201%20-%20Constante%20Elastica?sequence=1>

8. Сервей Р. А., Джуэтт Дж. В. Физика для науки и техники. Т.1. Мексика: изд. CENGAGE, 2019.

9. Петров А.Г., Шундерюк М.М. О нелинейных колебаниях тяжелой материальной точки на пружине // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2010. № 2. С. 27-40.

10. Саитов Ш.К.У. Анализ движения механической системы в обобщенных координатах // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XX Международной научно-практической конференции. Пенза, 2019. С. 68-71.

11. Полищук А.Д., Гаранкина Е.Н. Колебания цилиндрических пружин // Технические науки - от теории к практике. 2012. № 11. С. 56-62.

12. Сайт «SparkFun Electronics». URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/ Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

13. Сайт «Arduino Hardware». URL: <https://www.arduino.cc/en/hardware>.

14. Васильев А.В., Федоров Н.Н. Результаты теоретического и экспериментального исследования колебаний витков клапанных пружин механизма газораспределения двигателя // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. 2010. Т. 3. № 10 (70). С. 144-146.

15. Полищук А.Д. Использование форм колебаний при исследовании колебаний винтовых цилиндрических пружин // Вестник Башкирского университета. 2020. Т. 25. № 2. С. 239-244.

16. Миронова Л.И., Кондратенко Л.А. Колебания в нелинейном подпружиненном механизме с одной степенью свободы // Нелинейная динамика машин - School-NDM 2017: сборник IV Международной Школы-конференции молодых ученых. М., 2017. С. 356-363.

17. Сорокин Ф.Д., Су Ч. Виток пружины как конечный элемент для исследования динамики "длинных" пружин // Механика и математическое моделирование в технике: сборник тезисов. М., 2016. С. 80-84.

18. Маркеев А.П. Об устойчивости нелинейных колебаний связанных маятников // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2013. № 4. С. 20-30.

19. Сайт «EiscoLabs» Resorte de movimiento armónico de acero inoxidable, 7 pulgadas de largo, resorte constante 9-9.5 N/m: Amazon.es: Oficina y papelería. URL: <https://www.amazon.es/Eisco-Labs-movimiento-inoxidable-constante/dp/B00PYRLNUK>

20. Баргуев С.Г., Миждон А.Д. Определение собственных частот простейшей механической системы на упругом основании // Вестник Бурятского государственного университета. 2009. № 9. С. 58-63.

21. Рыков С.П., Антонов И.В. Датчик колебаний: оценка конструктивных и эксплуатационных параметров // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 1. С. 212-219.

22. Ибрагимов М.А., Инсапов Д.М. Обзор конструкций винтовых цилиндрических пружин, обладающих демпфирующими свойствами // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сборник трудов по результатам международной интернет-конференции. М., 2020. С. 372-379.

23. Попов И.П. Математическое моделирование мультиинертного колебательного механизма // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 1. С. 22-29.

References

1. Palochkin S.V., Koshkin A.V. Eksperimental'noe opredelenie koeffitsientov pogloshcheniya tarel'chatykh pruzhi [Experimental determination of absorption coefficients of poppet springs]. *Sovremennye problemy teorii mashin = Modern Problems of Machine Theory*, 2017, no. 5, pp. 45-48.

2. Pat. 170853 Russian Federation IPC U1, *Ustroistvo dlya demonstratsii i issledovaniya svobodnykh kolebaniy fizicheskogo mayatnika* [A device for demonstrating and investigating free oscillations of a physical pendulum]. V.V. Dubinin, V.V. Vitushkin, No. 2016150472, announced on 21.12.2016; published on 11.05.2017.

3. Mizhidon A.D., Barguev S.G. O sobstvennykh kolebaniyakh mekhanicheskoi sistemy kaskadnogo tipa, ustanovlennoi na uprugom sterzhne [On natural oscillations of a cascade-type mechanical system mounted on an elastic rod]. *Vestnik VSGTU = Bulletin of VSSTU*, 2010, no. 1, pp. 26-32.

4. Grishko D.A., Lapshin V.V., Studennikov E.S., Tarasenko A.N., Leonov V.V. Nelineinyye kolebaniya mekhanicheskikh sistem s odnoi i dvumya stepenyami svobody [Nonlinear oscillations of mechanical systems with one and two degrees of freedom]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, no. 6 (78), p. 2.

5. Pirogov S.P., Chuba A.Yu. [Experimental studies of natural vibration frequencies of tubular gauge springs]. *Problemy ekspluatatsii sistem transporta: sbornik materialov vse-rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Problems of operation of transport systems. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Tyumen, 2008, pp. 243-245 (In Russ.).
6. Hewitt P. *Kontseptual'naya Fizika* [Conceptual Physics]. Mexico, Obshchestvennoe obrazovanie v Meksike Publ., 2016, 816 p.
7. Alonso V. Determinación de la constante elástica de un muelle por dos métodos: Estático y Dinámico: Repositorio Documental. Universidad de Valladolid. 2017. Available at: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/30838/Practica%201%20-%20Constante%20Elastica?sequence=1>
8. Servey R. A., Jewett J. V. *Fizika dlya nauki i tekhniki* [Physics for Science and technology]. Vol. 1. Mexico, CENGAGE Publ., 2019.
9. Petrov A.G., Shunderiyuk M.M. O nelineinykh kolebaniyakh tyazheloi material'noi tochki na pruzhine [On nonlinear oscillations of a heavy material point on a spring]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics*, 2010, no. 2, pp. 27-40.
10. Saitov Sh.K.U. [Analysis of the motion of a mechanical system in generalized coordinates]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statei XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Fundamental and applied scientific research: topical issues, achievements and innovations: collection of articles of the XX International Scientific and Practical Conference]. Penza, 2019, pp. 68-71 (In Russ.).
11. Polishchuk A.D., Garankina E.N. Kolebaniya tsilindricheskikh pruzhin [Vibrations of cylindrical springs]. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike = Technical Sciences - from Theory to Practice*, 2012, no. 11, pp. 56-62.
12. SparkFun Electronics website. Available at: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
13. The Arduino Hardware website. Available at: <https://www.arduino.cc/en/hardware> .
14. Vasiliev A.V., Fedorov N.N. Rezul'taty teoreticheskogo i eksperimental'nogo issledovaniya kolebanii vitkov klapannykh pruzhin mekhanizma gazoraspredeleniya dvigatelya [Results of theoretical and experimental study of the oscillations of the valve springs of the valve timing mechanism of the engine]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnye transportnye sistemy = Proceedings of the Volgograd State Technical University. Series: Ground Transport Systems*, 2010, vol. 3, no. 10 (70), pp. 144-146.

15 Polishchuk A.D. Ispol'zovanie form kolebanii pri issledovanii kolebanii vintovykh tsilindricheskikh pruzhin [The use of vibration forms in the study of vibrations of helical cylindrical springs]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of the Bashkir University*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 239-244.

16. Mironova L.I., Kondratenko L.A. [Oscillations in a nonlinear spring-loaded mechanism with one degree of freedom]. *Nelineinaya dinamika mashin - School-NDM 2017. Sbornik IV Mezhdunarodnoi Shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Nonlinear dynamics of machines - School-NDM 2017. Collection of the IV International School-Conference of Young Scientists]. Moscow, 2017, pp. 356-363 (In Russ.).

17. Sorokin F.D., Su Ch. [A coil of a spring as a finite element for the study of the dynamics of "long" springs]. *Mekhanika i matematicheskoe modelirovanie v tekhnike. Sbornik tezisov* [Mechanics and mathematical modeling in engineering. Collection of theses]. Moscow, 2016, pp. 80-84 (In Russ.).

18. Markeev A.P. Ob ustoichivosti nelineinykh kolebanii svyazannykh mayatnikov [On the stability of nonlinear oscillations of coupled pendulums]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid state mechanics*, 2013, no. 4, pp. 20-30.

19. Website of "EiscoLabs" Resorte de movimiento armónico de acero inoxidable, 7 pulgadas de largo, resorte constante 9-9.5 N/m : Amazon.es : Oficina y papelería. Available at: <https://www.amazon.es/Eisco-Labs-movimiento-inoxidable-constante/dp/B00PYRLNUK>

20. Barguev S.G., Mizhidon A.D. Determination of natural frequencies of the simplest mechanical system on an elastic base. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Bulletin of the Buryat State University*, 2009, no. 9, pp. 58-63.

21. Rykov S.P., Antonov I.V. Datchik kolebanii: otsenka konstruktivnykh i ekspluatatsionnykh parametrov [Vibration sensor: evaluation of design and operational parameters]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 212-219.

22. Ibragimov M.A., Insapov D.M. [Overview of the designs of helical cylindrical springs with damping properties]. *Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta. Sbornik trudov po rezul'tatam mezhdunarodnoi internet-konferentsii* [Modern problems of railway transport. Collection of works based on the results of an international Internet conference]. Moscow, 2020, pp. 372-379 (In Russ.).

23. Popov I.P. Matematicheskoe modelirovanie mul'tiinertnogo kolebatel'nogo mekhanizma [Mathematical modeling of a multi-inert oscillatory mechanism]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 22-29.

Информация об авторах / Information about the Authors

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>, Researcher ID: 176177

Рукавицын Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alruk75@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>, Researcher ID: 423663

Ломас Арсиниега Вашингтон Патрисио, лаборант Центра Физики UCE (EC-170521), Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: wplomas@uce.edu.ec

Теран Акоста Гильермо Рубен, доцент факультета философии, литературы и педагогических наук, Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: grteran@uce.edu.ec

Авалос Касканте Фаусто Эдуардо, доцент факультета инженерии и прикладных наук, Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: feavalosc@uce.edu.ec

Пуэбла Пуэбла Рауль Эдуардо, доцент факультета инженерии и прикладных наук, Центральный университет Эквадора, г. Кито, Республика Эквадор, e-mail: repuebla@uce.edu.ec

Evgeny N. Politov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>, Researcher ID: 176177

Alexander N. Rukavitsyn, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alruk75@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>, Researcher ID: 423663

Lomas Arsignega Washington Patricio, Laboratory Assistant at the USER Physics Center (EC-170521), Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: wplomas@uce.edu.ec

Tiran Acosta Guillermo Ruben, Associate Professor of the Faculty of Philosophy, Literature and Pedagogical Sciences, Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: grteran@uce.edu.ec

Avalos Cascante Fausto Eduardo, Associate Professor, Faculty of Engineering and Applied Sciences, Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: feavalosc@uce.edu.ec

Puebla Puebla Raul Eduardo, Associate Professor, Faculty of Engineering and Applied Sciences, Central University of Ecuador, Quito, Republic of Ecuador, e-mail: repuebla@uce.edu.ec

Многокритериальная оптимизация проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом

С. В. Чуйкин ¹ ✉, О. А. Куцыгина ¹

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

✉ e-mail: ser.chu@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Наиболее энергоемкими объектами для проведения спортивных и культурно-массовых мероприятий являются крытые катки и ледовые арены. Упрощенные технические решения при проектировании систем обеспечения микроклимата данных помещений приводят к значительным расходам при эксплуатации, что может вызвать серьезные отрицательные проявления в относительно короткий срок. В связи с этим, возрастает актуальность разработки методов выбора оптимального проектного решения названных систем. Целью статьи является разработка математической модели многокритериальной оптимизации проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом.

Методы. Определение оптимального проектного решения систем обеспечения микроклимата по нескольким параметрам, каждый из которых может являться определяющим, является прикладной задачей системного анализа, основные принципы и закономерности которого были учтены при решении задачи многокритериальной оптимизации.

Результаты. Определен перечень частных критериев оптимальности, отражающих качественные и количественные характеристики проектных решений. Для поиска оптимального решения по выбранным частным критериям использована методика свертывания векторного критерия. Разработана оптимизационная модель, основывающаяся на принципах системного анализа.

Заключение. Разработанная математическая модель многокритериальной оптимизации позволяет обеспечить приоритет более важным частным критериям за счет увеличения их весов. В этом случае, следует помнить, что частные критерии должны быть соизмеримы, а значит, приведены к безразмерному виду. Поскольку в рассматриваемой задаче оптимизации имеют существенное значение абсолютные величины критериев, при выбранном векторе параметров необходимо выбрать именно аддитивный метод свертывания обобщенного критерия.

Ключевые слова: вентиляция; кондиционирование воздуха; ледовые арены; катки; системный анализ; многокритериальная оптимизация.

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

Для цитирования: Чуйкин С. В., Куцыгина О. А. Многокритериальная оптимизация проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 39-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-39-52>.

Поступила в редакцию 04.05.2022

Подписана в печать 17.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Multicriteria Optimization of Design Solutions for Microclimate Systems for Rooms with Artificial Ice

Sergey V. Chuykin ¹ ✉, Olga A. Kutsygina ¹

¹ Voronezh State Technical University
84, 20th anniversary of October str., Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The most energy-intensive facilities for holding sports and cultural events are indoor ice rinks and ice arenas. Simplified technical solutions when designing the systems for providing the microclimate of these structures lead to significant operating costs and can lead to serious negative consequences in a relatively short period. In this regard, the problem of developing methods for choosing the optimal design solution for these systems is becoming ever more urgent. The purpose of the article is to develop a mathematical model for multi-criteria optimization of design solutions for systems providing the microclimate of rooms with artificial ice.

Methods. Determining the optimal design solution for microclimate systems in terms of several parameters, each of which can be decisive, is an applied task of system analysis, the basic principles and patterns of which were taken into account when solving the problem of multicriteria optimization.

Results. A list of particular optimality criteria reflecting the qualitative and quantitative characteristics of design solutions has been determined. The method of vector criterion convolution has been used to search for the optimal solution for the selected particular criteria. An optimization model based on the principles of system analysis has been developed.

Conclusion. The developed mathematical model of multicriteria optimization makes it possible to provide priority to more important particular criteria by increasing their weights. In this case, it should be remembered that particular criteria must be commensurate, and, therefore, reduced to a dimensionless form. Since the absolute values of the criteria are essential in the optimization task under consideration, for the chosen vector of parameters, it is necessary to choose exactly the additive method of folding the generalized criterion.

Keywords: ventilation; air conditioning; ice arenas; skating rinks; system analysis; multicriteria optimization.

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

For citation: Chuykin S. V., Kutsygina O. A. Multicriteria Optimization of Design Solutions for Microclimate Systems for Rooms with Artificial Ice. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 39-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-39-52>.

Received 04.05.2022

Accepted 17.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Современные объекты общественно-го назначения для проведения спортивных и культурно-массовых мероприятий представляют собой сложный комплекс инженерно-строительных систем и сооружений, к которым предъявляются жесткие архитектурно-строительные санитарно-гигиенические и энергосберегающие требования [1-5]. Наиболее энергоемкими объектами данного назначения являются крытые помещения с искусственным льдом, к которым относятся катки и ледовые арены.

Анализ существующих проектов показывает [6], что затраты на конструирование, строительство и эксплуатацию систем жизнеобеспечения данных объектов, к которым относятся системы холодоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, достигают весьма значительных величин. Это приводит к увеличению эксплуатационных расходов и уменьшению коммерческой прибыли. В случае нарушения технологического цикла функционирования помещений с искусственным льдом, например повышение относительной влажности и увеличение подвижности воздуха у ледового поля, в течение нескольких лет эксплуатации, может наблюдаться коррозия строительных конструкций, образование конденсата, и как следствие плесени на поверхностях и ограждениях. Кроме того, упрощенные технические решения при

проектировании названных инженерных систем часто приводят к значительным расходам при эксплуатации. Стремление к снижению капитальных и эксплуатационных затрат на системы обеспечения микроклимата может привести к серьезным отрицательным проявлениям в относительно короткий срок [4-6].

Как отмечается в [6], успешное функционирование крытых катков и ледовых арен в долгосрочной перспективе обеспечивается при покрытии избытками прибыли процентных взносов и выплат, а так же при содержании объекта и его инфраструктуры в надлежащем состоянии. Таким образом, необходимо определить оптимальное соотношение величины затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию объектов рассматриваемого типа с учетом требований к обеспечению необходимых санитарно-гигиенических параметров внутреннего воздуха в зонах нахождения людей, предотвращению образования конденсата на строительных конструкциях сооружения и поддержанию необходимого качества поверхности льда.

Однако не представляется возможным найти прямую связь, например, между энергозатратами на обработку приточного воздуха в центральном кондиционере, концентрацией загрязняющих веществ в рабочей зоне и параметрами комфортного пребывания в помещении, причем каждый из возможных параметров или коэффициентов может являться определяющим при выборе

проектного решения в зависимости от технического задания на проектирование. В связи с этим, возрастает актуальность разработки методов выбора оптимального проектного решения систем обеспечения микроклимата, основывающегося на многокритериальном анализе [1, 2]. В связи с вышесказанным, целями данной статьи являются: выбор методики решения оптимизационной задачи; определение перечня частных критериев оптимальности, отражающих качественные и количественные характеристики проектных решений; разработка оптимизационной математической модели, основывающейся на принципах системного анализа.

Материалы и методы

Постановка задачи многокритериальной оптимизации проектных решений систем обеспечения микроклимата

В зависимости от вида взаимосвязи между переменными в модели оптимизационной задачи, она может решаться с помощью линейного, нелинейного, целочисленного, квадратичного, стохастического программирования. Согласно работам [7-11] решение задачи оптимизации проектных решений можно свести к выбору изменяемых параметров x , которые принадлежат допустимой области R , и обеспечивающих экстремальное значение выбранного критерия оптимальности $\Psi(x)$.

В общем виде, математическая модель в задачах многокритериальной оптимизации записывается в виде

$$\min_{x \in R} \Psi(x). \quad (1)$$

Подобным образом оптимизационная задача формулируется при наличии нелинейных ограничений, которые связывают изменяемые параметры x между собой, и называется задачей нелинейного программирования, где

$$R = \{x | g_i(x) \geq 0, i = 1, \dots, K\}. \quad (2)$$

Поскольку в рассматриваемой задаче необходимо найти наилучшее решение по нескольким противоречивым (увеличение одного приводит к уменьшению другого) частным критериям $\Psi_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, N$, для совместного учета всей их совокупности принято рассматривать векторный критерий оптимальности

$$\Psi(x) = (\Psi_1(x), \Psi_2(x), \dots, \Psi_N(x)), \quad (3)$$

данная задача получила название векторной оптимизации [4, 5].

$$\min_{x \in R} \Psi_1(x), \dots, \min_{x \in R} \Psi_N(x). \quad (4)$$

Для решения задачи векторной оптимизации важное значение имеет качественная информация о множестве частных критериев [4, 5, 12], которая может быть задана в виде ряда приоритетов

$$\Psi_1 \succ \Psi_2 \succ \dots \succ \Psi_N, \quad (5)$$

т.е. критерий Ψ_1 более важен, чем критерий Ψ_2 , критерий Ψ_2 более важен, чем критерий Ψ_3 и т.п. Для учета важности частных критериев разработано несколько методик, наибольшее распространение из которых получили [7, 8, 12, 13]:

I. Методика последовательной оптимизации частных критериев с учетом жесткого приоритета, она так же получила название методики лексикографического упорядочения. Она характеризуется тем, что минимизация n -го критерия осуществляется только после получения минимального значения всех предыдущих $(n - 1)$ -ых частных критериев.

Основной недостаток данной методики заключается в вырождении в точку области удовлетворительных решений R . В связи с чем не представляется возможным учет менее важных критериев оптимальности, поскольку не допускается их увеличение (уменьшение), если это вызывает соответствующее уменьшение (увеличение) более важного критерия. Этот недостаток частично возможно сгладить за счет методики II [7, 8].

II. Методика последовательных уступок. Эта методика является своего рода модификацией предыдущей, а ее основная идея заключается в последовательном введении на каждом шаге оптимизации уступки $\Delta\Psi_{n-1}$, которая характеризует допустимое отклонение $(n - 1)$ -ого критерия от его минимального значения [7, 8, 12].

Введение упомянутой уступки наиболее важному частному критерию приводит к возможности улучшения менее важного критерия оптимальности. В то же время видно, при какой именно уступке по $(n - 1)$ -му критерию достигается тот или иной положительный результат.

III. Методика выделения главного критерия. Ее основной принцип заключается в поиске минимума наиболее важного или главного критерия оптимальности $\Psi_1(x)$, а значения других критериев $\Psi_2(x)$, $\Psi_3(x)$ и т.д. не должны превышать определенных пороговых значений. Таким образом, формулируемая задача записывается в виде

$$\min_{x \in R'} \Psi_1(x), \quad (6)$$

$$R' = R \cap R_0; R_0 = \{x | g_i(x) \leq g_i^0, i = \overline{2, N}\}. \quad (7)$$

Как отмечается в работах [7-12] данная задача эквивалентна задаче параметрической оптимизации. При этом основной трудностью применения данного метода является поиск (определение) порогового значения g_i^0 , для вычисления которого необходимо применять специальные методы.

Упомянутые выше три метода учета важности критериев оптимальности предполагают наличие превосходящего над остальными критерия, однако при решении поставленной задачи оптимизации проектных решений систем обеспечения микроклимата не всегда можно выделить доминирующий критерий, по этой причине следует рассмотреть и другие варианты свертывания.

IV. Методика гарантированного результата, для которой характерно изменение наихудшего критерия до уровня основных критериев, в результате данная задача эквивалентна задаче параметрической оптимизации, реализуемой методами уступок с упомянутыми недостатками

для рассматриваемой в данной работе задачи оптимизации.

V. Методика равенства частных критериев. Характеризуется равноценностью по важности частных критериев оптимальности. В связи с этим стремятся уравнивать все значения критериев между собой, а сама задача записывается в виде

$$\min_{x \in R} \Psi_k(x), \quad (8)$$

$$R_1(x) = R_2(x) = \dots = R_k(x). \quad (9)$$

Как отмечается в работе [5] основным недостатком данного метода является неразрешимость задачи (8), либо ее оптимальное решение не будет являться эффективной точкой для исходной задачи векторной оптимизации.

VI. Методика идеальной точки, характеризуется необходимостью задания дополнительной информации в виде идеального решения, а исходная задача решается путем построения обобщенного критерия и однокритериальной задачи оптимизации [12], которая обеспечивает наибольшее совпадение с идеальным решением. Данный метод свертывания так же не может быть применен при решении рассматриваемой задачи, поскольку не существует идеального варианта проектного решения систем обеспечения микроклимата.

VII. Методика свертывания векторного критерия. Является наиболее предпочтительной для рассматриваемой задачи. Она так же получила широкое распространение при решении и других оптимизационных задач [7, 12-20 и др.].

Суть методики заключается в объединении частных критериев оптимальности в один интегральный критерий, после чего определяется минимум или максимум этого критерия. Осуществление объединения частных критериев на основе их объектной взаимосвязи зачастую невозможно из-за большого различия физической интерпретации рассматриваемых при проектировании тепловых сетей параметров. В связи с этим, обобщенный критерий является формальным частных критериев.

В данной методике важность критерия учитывается за счет построения скалярной функции S , которая является обобщенным критерием векторного критерия $\Psi(x)$

$$\min_{(x \in R)} S(\chi, \Psi(x)), \quad (10)$$

где $\chi = (\chi_1, \dots, \chi_n)$ – вектор весов частных критериев [6, 7, 12 и др.].

Как отмечается в работах [7, 8, 12], обобщенный критерий может быть представлен функциями S различного типа, например:

а) среднестепенной критерий, представляется как функция

$$S_d(\chi, \Psi(x)) = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_i \Psi_i^d(x) \right)^{1/d}, d > 0; \quad (11)$$

б) логические критерии оптимальности, представляются в виде функции

$$S_{\max}(\chi, \Psi(x)) = \max_{1 \leq i \leq N} \{ \chi_i \Psi_i(x) \}; \quad (12)$$

$$S_{\min}(\chi, \Psi(x)) = \max_{1 \leq i \leq N} \{ \chi_i \Psi_i(x) \}; \quad (13)$$

в) мультипликативный критерий оптимальности, представляется в виде функции

$$S_{\Sigma}(\chi, \Psi(x)) = \prod_{i=1}^N \chi_i \Psi_i(x). \quad (14)$$

Данный обобщенный критерий оптимальности, при условии неравнозначности частных критериев, образуется за счет перемножения произведения этих частных критериев и их весовых значений $\chi_i \Psi_i$ между собой. В работе [17] отмечается, что плюсом данного вида обобщенного критерия является то, что при его свертывании не требуется нормировать частные критерии оптимальности, так же в большинстве случаев можно определить одно оптимальное решение.

К минусам можно отнести взаимную компенсацию частных критериев, в результате чего наблюдается тенденция сглаживания уровней частных критериев, кроме того применение данного вида свертывания предполагает перемножение критериев с разной размерностью, т.е. имеющих различную природу [18].

г) аддитивный критерий оптимальности, представляется в виде функции

$$S_{\Sigma}(\chi, \Psi(x)) = \sum_{i=1}^N \chi_i \Psi_i(x). \quad (15)$$

Данный обобщенный критерий оптимальности получается путем сложения нормированных значений частных критериев. Так же этот метод называют методом взвешенных сумм, он позволяет обеспечить приоритет более важным частным критериям за счет увеличения

их весов. В этом случае следует помнить, что частные критерии должны быть соизмеримы, а значит, приведены к безразмерному виду.

Из уравнения (15) видно, что второй немаловажной задачей при решении оптимизационной задачи с помощью данного метода, является определение весового показателя χ_i частного критерия Ψ_i . Данный параметр определяет важность i -го критерия, и задает количественное предпочтение этого критерия над остальными.

В случае равноценности выбранных частных критериев, вес каждого критерия принимается одинаковым, для неравноценных – вес или приоритет, выбирают в соответствии с важностью критерия

$$\chi_i > 0, \sum_{i=1}^m \chi_i = 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

Одним из способов определения веса частного критерия является методика ранжирования, которая характеризуется тем, что в качестве веса критерия выступает относительная частота преобразованных рангов, которые заносятся в табл.1.

После определения рангов вес критерия определяется по формуле

$$\chi_i = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}, \quad (17)$$

где ω_{ij} – преобразованный ранг критерия оптимальности, получаемый путем назначения единицы критерию с мак-

симальным весом, двойке – следующему по значимости и так далее.

Наибольшую важность имеет критерий с минимальным значением отно-

сительной частоты рангов, что соответствует поиску минимума рассматриваемых критериев оптимальности.

Таблица 1. Преобразованные ранги рассматриваемых критериев оптимальности

Table 1. Transformed ranks of the optimality criteria under consideration

Эксперт / Expert	Преобразованный ранг критериев / Transformed rank of optimality criteria				χ_n
	χ_1	χ_2	χ_3	...	
1	Оценки 1-го эксперта				
2	Оценки 2-го эксперта				
3	Оценки 3-го эксперта				
...	...				
<i>n</i>	Оценки <i>n</i> -го эксперта				

Обоснование выбора критериев оптимальности при системном анализе проектных решений систем обеспечения микроклимата

Назначение частных критериев оптимальности для каждого отдельного случая является эвристически плохо формализованной задачей, а ее решение затрудняется необходимостью удовлетворения следующих отчасти противоречивых условий, приведенных на рис.1. Поскольку рассматриваемый объект исследований является сложной системой, зависящей от большого числа факторов, выбранный критерий оптимальности должен как можно лучше отражать ее основные характеристики, к которым относятся: капитальные затраты на сооружение K ; эксплуатационные затраты $\mathcal{E}$; эффективность воздухообмена $k_{эф}$ и санитарно-эпидемиологическая безопасность, ε .

Капитальные затраты на сооружение инженерной инфраструктуры, а также расходы при ее эксплуатации зависят от конструктивных решений систем жизнеобеспечения, выбора строительных и отделочных материалов, оборудования и пр., их величину можно найти по известным зависимостям. Данные критерии являются своего рода количественной характеристикой проектного решения. Однако в связи с возможным возникновением сложной санитарно-эпидемиологической обстановки в настоящее время существует потребность в рассмотрении параметров, которые могли бы описать качественные характеристики выбираемых решений, например показатель эффективности удаления загрязняющих веществ и коэффициент эффективности воздухообмена.

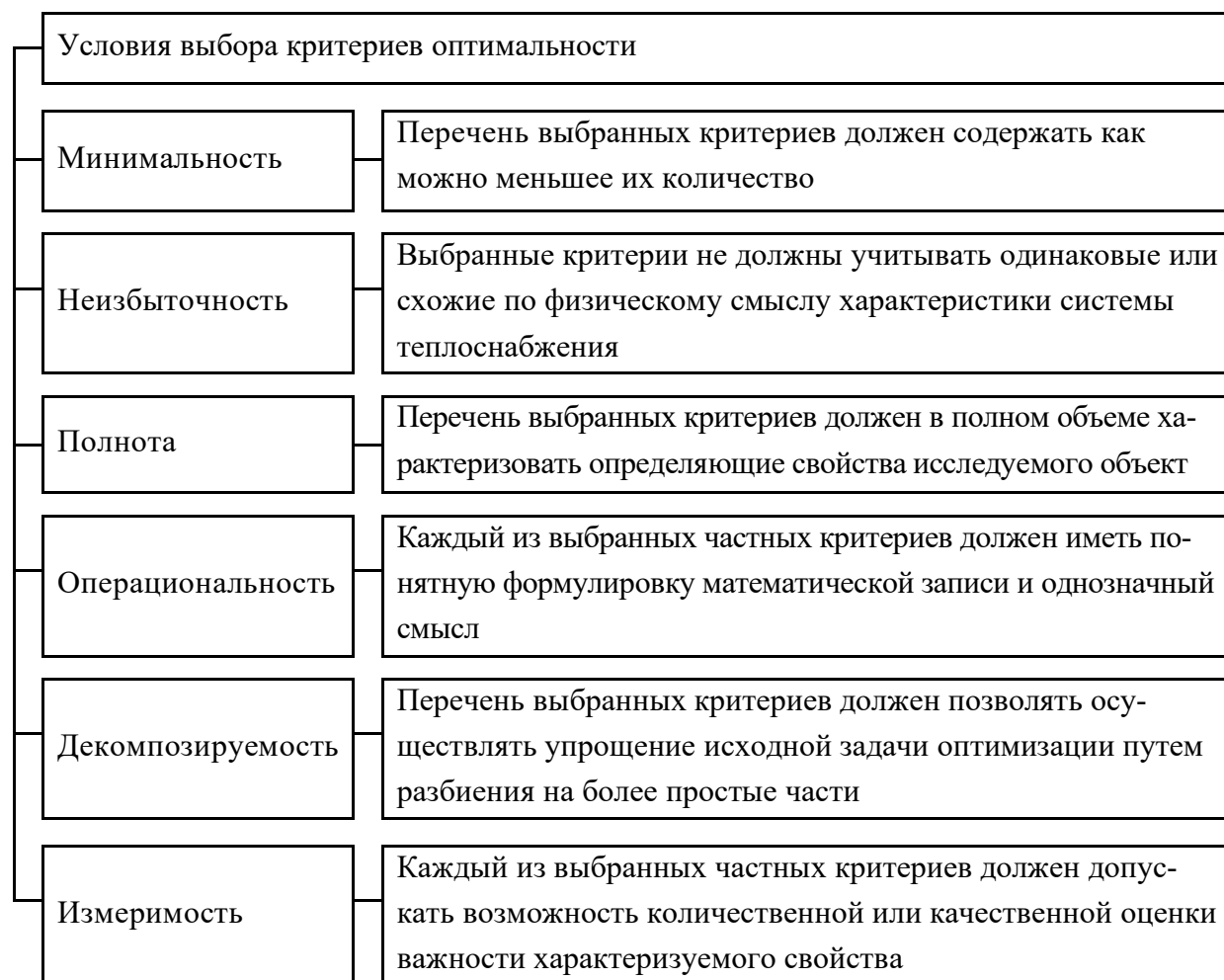


Рис. 1. Требуемые условия выбора частных критериев оптимальности

Fig. 1. Required conditions for selecting particular optimality criteria

Параметром, отражающим санитарно-эпидемиологическую безопасность, может служить эффективность удаления загрязняющих веществ, определяемая по формуле

$$\varepsilon = \frac{c_v - c_{пр}}{c_{оз} - c_{пр}}, \quad (18)$$

где c_v – концентрация загрязняющего вещества в вытяжном воздухе; $c_{пр}$ – концентрация загрязняющего вещества в приточном воздухе; $c_{оз}$ – концентрация загрязняющего вещества в воздухе обслуживаемой зоны.

Эффективность воздухообмена зависит от схемы организации воздухообмена и характеризует связь между параметрами удаляемого воздуха и воздуха в обслуживаемой зоне. Например для подачи воздуха из верхней зоны помещения коэффициент эффективности может быть определен по уравнению

$$k_{эф} = \frac{Q_{оз} + Q_{вз}}{Q_{оз} \left(\alpha - \frac{L_0}{L_{сп}} \frac{F_{сп}}{F_{п}} \right) + Q_{вз} \frac{\alpha L_{сп} - L_0}{L_{сп} - L_{м}}}, \quad (19)$$

где $Q_{оз}$ – выделение теплоты в обслуживаемой зоне помещения; $Q_{вз}$ – выде-

ление теплоты в верхней зоне помещения; L_0 – расход приточного воздуха; $L_{стр}$ – расход воздуха в струе; L_m – расход воздуха местными системами вентиляции; $F_{стр}$ – расчетное сечение струи; F_n – расчетное сечение помещения на одну струю.

Для первых трех параметров оптимизируемая функция минимизируется, в отличие от коэффициента эффективности. Чем он выше, тем меньше приточного воздуха необходимо подавать в помещение для ассимиляции теплоизбытков, что свидетельствует о большей эффективности схемы воздухораспределения. Таким образом, при решении оптимизационной задачи представляется удобным привести все критерии к единообразию, например к поиску минимума. Тогда, в качестве критерия оптимальности допустимо рассматривать обратную к ней величину $k_{эф}^{об} = 1/k_{эф}$.

Результаты и их обсуждение

Поскольку в рассматриваемой задаче оптимизации имеют существенное значение абсолютные величины критериев при выбранном векторе параметров необходимо выбрать именно аддитивный метод свертывания обобщенного критерия. Он же получил наибольшее распространение для рассматриваемого типа оптимизационной задачи.

Поскольку значения параметров K , Δ , $k_{эф}$ и ε значительно отличаются (например капитальные затраты могут достигать сотен тысяч или миллионов, а коэффициент эффективности воздухо-

обмена – единиц), необходимо проводить их нормирование, которое представляет собой поиск отношения частного критерия оптимальности к некоторой нормирующей величине. В качестве нормирующего делителя предлагается применять так называемое директивное значение частных критериев, которое задается экспертом. Тогда преобразованный частный критерий оптимальности будет определяться по формуле

$$\psi_i(x) = \frac{\Psi_i(x)}{\Psi_i^{норм}(x)}, \quad (20)$$

где $\Psi_i(x)$ – частный критерий оптимальности до нормирования; $\Psi_i^{норм}(x)$ – i -й нормируемый делитель; $\psi_i(x)$ – нормированное значение частного критерия оптимальности.

Совместное решение уравнений (15) и (20) позволяет получить модель аддитивного критерия оптимальности выбора проектного решения систем обеспечения микроклимата, который запишется в виде

$$S = \chi_K \left(\frac{K_i(x)}{K_i^{норм}(x)} \right) + \chi_{\Delta} \left(\frac{\Delta_i(x)}{\Delta_i^{норм}(x)} \right) + \chi_{k_{эф}} \left(\frac{k_{эф}^{об}(x)}{k_{эф}^{об,норм}(x)} \right) + \chi_{\varepsilon} \left(\varepsilon \frac{\varepsilon_i(x)}{K_i^{норм}(x)} \right) \rightarrow \min, \quad (21)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – рассматриваемые варианты проектного решения.

Выводы

Предложенная математическая модель выбора оптимального проектного решения систем обеспечения микроклимата, основывающаяся на методике свертывания аддитивного векторного критерия, отличается от существующих возможностью учета качественных и количественных характеристик рассматрива-

емого объекта, что позволяет повысить точность решения рассматриваемой многокритериальной оптимизационной задачи. Вводится уточнение, позволяющее привести частные критерии оптимальности к единообразию при поиске экстремума оптимизируемой аддитивной функции путем рассмотрения обратной величины коэффициента эффективности воздухообмена.

Список литературы

1. Melkumov V.N., Chuikin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas // *Journal of Technology*. 2017. Т. 32. № 2. С. 139-146.
2. Melkumov V.N., Chuykin S.V. Organization of air distribution of covered multipurpose ice rinks // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013. № 3 (19). С. 17-28.
3. Сошин Р.О., Ткаченко Н.В. Анализ обследования систем обеспечения микроклимата ледовой арены "Ерофей" // *Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ*. 2017. №3. С. 357-360.
4. Почекунин П.С. Особенности создания параметров микроклимата во влажных помещениях с пониженной температурой // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2022. №1(50). С. 65-72.
5. Русаков С.В. Оценка влияния влажности воздуха на качество микроклимата в зале ледового катка и на состояние ледовой поверхности // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование*. 2015. № 2. С. 92-101.
6. Руководство ИИХФ по ледовым аренам. М.: Из-во ИИХФ, 2016. 104 с.
7. Батищев Д.И., Шапошников Д. Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. Н.Новгород: ИПФ РАН, 1994. 92 с.
8. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
9. Чуйкин С.В., Колосов А.И. Многокритериальный анализ экологической безопасности объектов строительства // *Экология и промышленность России*. 2020. №3(24). С. 54-57.
10. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк: ЛЭГИ, 2001. 138 с.

11. Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. 157 с.
12. Чуйкина А.А. Разработка методики определения наилучшего варианта трассы тепловой сети на начальном этапе проектирования // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. №3(63). С. 57-64.
13. Гвишиани Д.М., Емельянова С.В. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Машиностроение, 1978. 191 с.
14. Муромцев Д.Ю., Шамкин В.Н. Методы оптимизации и принятие проектных решений. Тамбов: Изд-во «ТГТУ», 2015. 80 с.
15. Ногин В.Д. Линейная свертка в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. №4. С. 73-82.
16. Романова И.К. Об одном подходе к определению весовых коэффициентов метода пространства состояний // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №4. С. 105-129.
17. Тимофеев М.В. Математическое моделирование процессов в технологии машиностроения. Рыбинск: РГТУ имени П.А. Соловьёва, 2015. 155 с.
18. Fourer R., Gay D., Kernighan B., AMPL, A Modeling Language for Mathematical Programming, Second Edition. Belmont: Duxbury Press, 2003. 517 p.
19. J. Nocedal and S. J. Wright. Numerical Optimization. Springer New York, Second edition, 2006.
20. Mark Schmidt, Nicolas L Roux, Francis R Bach. Convergence rates of inexact proximalgradient methods for convex optimization // In Advances in neural information processing systems, pages 1458-1466, 2011.

References

1. Melkumov V.N., Chuikin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas. *Journal of Technology*, 2017, no. 322, pp.139-146.
2. Melkumov V.N., Chuykin S.V. Organization of air distribution of covered multipurpose ice rinks. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2013, no.3(19), pp. 17-28.
3. Soshin R.O., Tkachenko N.V. [Analysis of the survey of microclimate systems of the Yerofey Ice Arena]. *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU* [New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU], 2017, no.3, pp. 357-360 (In Russ.).
4. Pohekunin P.S. [Features of creating microclimate parameters in humid rooms with low temperature]. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* =

Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2022, no.1(50), pp. 65-72 (In Russ.).

5. Rusakov S.V. [Assessment of the influence of air humidity on the quality of the microclimate in the hall of the ice rink and on the condition of the ice surface]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie* = *Scientific journal of NIU ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning*, 2015, no.2, pp. 92-101 (In Russ.).

6. IIHF Guide to Ice arenas. Moscow, IIHF Publishing House, 2016, 104 p.

7. Batishchev D.I., SHaposhnikov D. E. *Mnogokriterial'nyy vybor s chetom individual'nyh predpochtenij* [Multi-criteria selection taking into account individual preferences]. N. Novgorod, 1994, 92 p.

8. Batishchev D.I. *Metody optimal'nogo projektirovaniya* [Methods of optimal design]. Moscow, 1984, 248 p.

9. Chujkin S.V., Kolosov A.I. [Multicriteria analysis of environmental safety of construction objects]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = *Ecology and industry of Russia*, 2020, no.3(24), pp. 54-57 (In Russ.).

10. Gvishiani D.M., Emel'yanova S.V. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij* [Multi-criteria decision-making tasks]. Moscow, 1978, 191 p.

11. Gitis L.H. *Statisticheskaya klassifikatsiya i klasternyy analiz* [Statistical classification and cluster analysis]. Moscow, 2003. 157 p.

12. Chujkina A.A. [Development of a methodology for determining the best option for the route of the thermal network at the initial stage of design]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arhitektury* = *Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2021, no. 3(63), pp. 57-64 (In Russ.).

13. Gvishiani D.M., Emel'yanova S.V. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij*. [Multi-criteria decision-making tasks]. Moscow, 1978, 191 p.

14. Muromcev D.YU., SHamkin V.N. *Metody optimizatsii i prinyatie proektnykh reshenij*. [Optimization methods and project decision-making]. Tambov, 2015. 80 p.

15. Nogin V.D. [Linear convolution in multi-criteria optimization]. *Linejnaya svertka v mnogokriterial'noj optimizatsii. Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* = *Artificial intelligence and decision-making*. 2014, no.4, pp. 73-82 (In Russ.).

16. Romanova I.K. [On one approach to determining the weighting coefficients of the state space method]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman* = *Science and Education: scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University*. 2015, no. 4, pp. 105-129 (In Russ.).

17. Timofeev M.V. *Matematicheskoe modelirovanie processov v tekhnologii mashinostroeniya* [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering technology]. Rybinsk, 2015, 155 p.

18. Fourer R., Gay D., Kernighan B., *AMPL, A Modeling Language for Mathematical Programming, Second Edition*. Belmont: Duxbury Press, 2003, 517 p.
19. Nocedal J., Wright S. J.. *Numerical Optimization*. Springer New York, Second edition, 2006.
20. Mark Schmidt, Nicolas L Roux, Francis R Bach. Convergence rates of inexact proximal gradient methods for convex optimization. *In Advances in neural information processing systems*, 2011, pp. 1458-1466.

Информация об авторах / Information about the Authors

Чуйкин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: ser.chu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-323X>, ResearcherID: R-3144-2016

Sergey V. Chuykin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Structural Mechanics Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ser.chu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-323X>, ResearcherID: R-3144-2016

Куцыгина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2296-3583>,

Olga A. Kutsygina, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2296-3583>

Краткосрочное прогнозирование объемов электропотребления для энергосбытовых компаний на основе интеграции технологий аналитических, имитационных и экспертных систем

А.К. Мектепкалиева¹, А.А. Ханова¹ ✉, Л.Б. Аминул¹

¹ Астраханский государственный технический университет
ул. Татищева, д. 16, г. Астрахань 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Совершенствование программной поддержки и выявление закономерностей процессов краткосрочного прогнозирования объемов электропотребления энергосбытовых компаний на основе взаимодополняющей интеграции моделей интеллектуального анализа данных, системной динамики и экспертных систем.

Методы. Приведены принципы построения прогностических моделей электропотребления. Проведен системный анализ и построена онтологическая модель предметной области с учетом технологической и рыночной среды. Рассмотрена классификация методов прогнозирования. Описаны особенности информационной базы для проведения краткосрочного прогнозирования, включающей данные о фактическом электропотреблении и метеоданные. Сформулированы требования к программному обеспечению для выполнения прогнозов. Построена структурная схема системы прогнозирования электропотребления рынка на сутки вперед на основе взаимодополняющей интеграции программного обеспечения анализа данных и моделирования.

Результаты. Разработаны сценарии обработки данных в LogiNot с использованием обработчиков Arimaх и Нейросеть (Регрессия) для построения прогнозов на основе фактического потребления электроэнергии и с учетом метеофакторов. В Anylogic разработана имитационная модель системной динамики, позволяющая исследовать влияние метеофакторов (температура, давление, осадки) на объем электропотребления. С помощью миварного конструктора экспертных систем Wi!Mi проведена параметризация задачи, заданы показатели, отношения, правила, получен логический вывод решения.

Заключение. Построена структурная схема системы прогнозирования электропотребления рынка на сутки вперед, основанная на анализе ретроспективной информации о фактическом электропотреблении и метеофакторах с использованием методов интеллектуального анализа данных, системной динамики и экспертных систем и российских программных средств LogiNot, Anylogic и Wi!Mi.

Ключевые слова: методы прогнозирования; интеллектуальный анализ данных; системная динамика; экспертная модель; оптовый рынок энергии и мощности; рынок на сутки вперед; онтология.

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

Для цитирования: Мектепкалиева А.К., Ханова А.А., Аминул Л.Б. Краткосрочное прогнозирование объемов электропотребления для энергосбытовых компаний на основе интеграции технологий аналитических, имитационных и экспертных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 53-71. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-53-71>.

Поступила в редакцию 18.05.2022

Подписана в печать 02.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Short-Term Forecasting of Power Consumption of Power Supply Companies Based on the Integration of Technologies of Analytical, Simulation and Expert Systems

Amina K Mektepkaliyeva ¹, Anna A. Khanova ¹ ✉, Lyubov B. Aminul ¹

¹ Astrakhan State Technical University
16, Tatishcheva str., Astrakhan 414056, Russian Federation

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Purpose of research is to improve software support and identify regularities in the processes of short-term forecasting of power consumption of power supply companies based on complementary integration of data mining models, system dynamics and expert systems.

Methods. The principles of constructing predictive models of power consumption are given. A system analysis has been carried out and an ontological model of the subject area has been built, taking into account the technological and market environment. The classification of forecasting methods has been considered. The features of the information base for short-term forecasting, including data on actual power consumption and weather data, have been described. The requirements for software for making forecasts have been formulated. A block diagram of the system for forecasting power consumption of the market for the day ahead is built based on the complementary integration of data analysis and modeling software.

Results. Scenarios for data processing in Loginom have been developed using the Arimax and Neural Network (Regression) processors to build forecasts based on actual power consumption and taking into account meteorological factors. A system dynamics simulation model that allows exploring the influence of meteorological factors (temperature, pressure, precipitation) on power consumption has been developed in Anylogic. Using Wi!Mi mivar constructor of expert systems, the task has been parametrized; indicators, relationships, rules have been set; a logical conclusion of the solution has been obtained.

Conclusion. A block diagram of a system for forecasting the market's power consumption for the day ahead has been built. It is based on the analysis of retrospective information on actual power consumption and meteorological factors using data mining methods, system dynamics and expert systems applying Russian Loginom, Anylogic and Wi!Mi software tools.

Keywords: forecasting methods; data mining; system dynamics; expert model; wholesale energy and capacity market; day-ahead market; ontology.

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

For citation: Mektepaliyeva A. K., Khanova A. A., Aminul L. B. Short-Term Forecasting of Power Consumption of Power Supply Companies Based on the Integration of Technologies of Analytical, Simulation and Expert Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 53-71 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-2-53-71](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-53-71).

Received 18.05.2022

Accepted 02.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Оптовый рынок электрической энергии и мощности (ОРЭМ) функционирует в рамках Единой энергетической системы (ЕЭС) России. На ОРЭМ осуществляется обращение особых товаров - электрической энергии (э/э) и мощности. В 2020 году оборот ОРЭМ составил 3,6 трлн. руб и включал 377 участников [1]. Через ОРЭМ осуществляется взаимодействие генераторов э/э (ГЭС, ТЭЦ, ГРЭС, АЭС) с покупателями (потребителями) э/э в лице гарантирующих по-

ставщиков, энергосбытовых компаний, крупных промышленных потребителей [2]. Физические лица оплачивают расходы за электроэнергию по региональным тарифам, которые устанавливаются государством ежегодно и в течение года не меняются. Часть юридических лиц покупают ее по нерегулируемым ценам на ОРЭМ, которые могут меняться фактически ежедневно. ОРЭМ осуществляет свою деятельность во влияющих на него средах: технологической и рыночной (рис. 1) [2, 3].

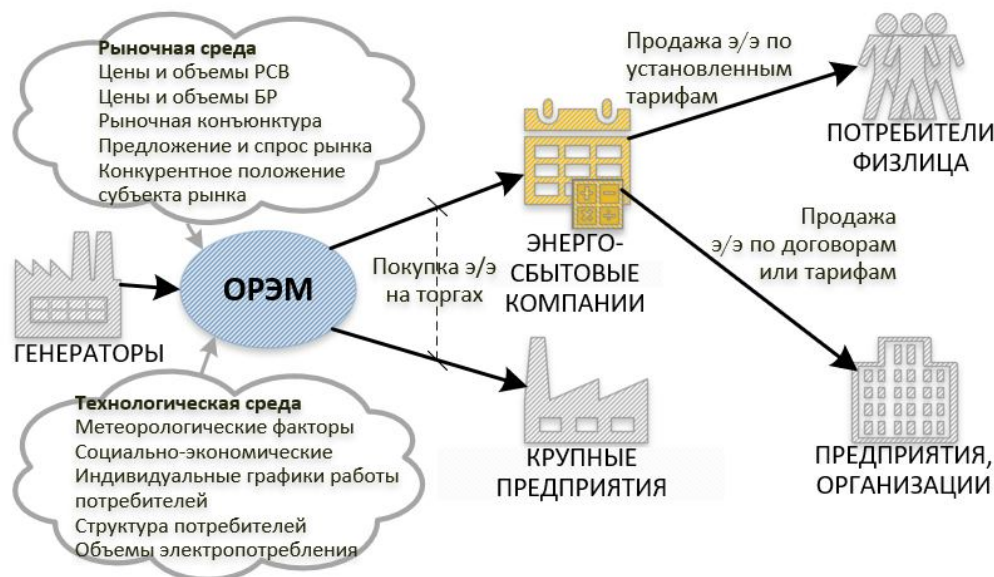


Рис. 1. Структура оптового рынка электрической энергии и мощности

Fig. 1. Structure of the wholesale electricity and capacity market

ОРЭМ состоит из трех секторов торговли электроэнергией: рынка двусторонних договоров, рынка на сутки вперед (РСВ) и балансирующего рынка

(БР) [4]. Наиболее весомым сегментом рынка ОРЭМ является РСВ. К настоящему времени доля продаж на РСВ достигла 73.2 % в I ценовой зоне и 63 %

во II ценовой зоне России, включая 1.2 млн ценовых заявок [1].

В связи с географическими особенностями, определяющими структуру электросети, потерями при транспортировке, полноценную конкуренцию на ОРЭМ в России создать не удалось [4]. Для организаций, регулирующих энергосистему, энергосбытовых компаний, а также крупных предприятий затраты на оплату счетов за электрическую энергию составляют значительную статью бюджета. Мониторинг и анализ факторов, влияющих на цены на электроэнергию, их количественная оценка и прогнозирование являются необходимой и достаточно рутинной задачей, обеспечивающей при этом существенную экономию для организаций [5].

Большое количество научных работ задачи по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления на основе искусственных нейронных сетей [6-7], методов анализа временных рядов, статистических моделей [8-9] и комбинированных методов [10] на предприятиях различных отраслей. Однако предложенные методы по отдельности не смогут обеспечить всесторонний анализ и прогнозирование объемов электропотребления на энергосбытовом предприятии, в связи с некоторыми ограничениями, к которым относятся: невозможность использования большого числа факторов, использование субъективных оценок, необходимость использования статистических выборок за большой период времени, требования

ми к техническим и программным инструментам. Анализ публикаций показал, что вопросы исследования алгоритмов и программной реализации процессов прогнозирования потребления электроэнергии, представляющие собой сложный многоэтапный и многоуровневый процесс, актуальны, но представлены фрагментарно и требует дальнейшей проработки. Цель работы – совершенствование программной поддержки и выявление закономерностей на основе взаимодополняющей интеграции моделей прогнозирования объемов энергопотребления для энергосбытовых компаний.

Материалы и методы

В основе создания системы прогнозирования параметров электропотребления лежат следующие принципы: 1) наличие информационной базы показателей технологической и рыночной сред; 2) сочетание классических и современных математических и экспертных методов; 3) применение для одного и того же объекта ансамбля прогнозных моделей; 4) использование соответствующего программного обеспечения.

По горизонту прогнозирования нагрузки на ОРЭМ в целом можно разделить следующие виды: оперативное, краткосрочное, среднесрочное и долгосрочное (рис. 2, а). Прогнозирование осуществляется на основе анализа фактической информации о динамике электропотребления за прошедшие периоды и действующих на него факторов.

К факторам рыночной среды можно отнести цены РСВ и БР, рыночные объемы спроса и предложения, рыночную конъюнктура и пр. (рис. 1) [3]. Социально-экономические факторы отражают зависимость динамики электропотребления от типов дней (рабочие, выходные и праздничные), продолжительности рабочих смен, производственных программ предприятий, особенностей графиков электропотребления отдельных объектов, экономической активности хозяйствующих субъектов (рис. 1) [3]. Ситуация на ОРЭМ в долгосрочной перспективе в значительной степени определяется социально-экономическими и рыночными факторами.

Влияние технологической среды определяется социально-экономическими и метеорологическими факторами. В среднесрочной перспективе зависит не только от социально-экономических и рыночных факторов, но и от производственных факторов, а также метеорологических условий. Метеофакторы отражают зависимость динамики электропотребления от погодных явлений, связанных с изменением долготы светового дня, временем захода и восхода солнца, температуры воздуха, а также возникновения атмосферных явлений и осадков [3]. При этом метеорологические факторы оказывают решающее влияние на краткосрочное (РСВ) и оперативное прогнозирование объемов электропотребления [11]. Онтология влияния внешних факторов на построение прогнозов на ОРЭМ представлена на рис. 2, б, в.

В настоящее время существует множество методов прогнозирования объемов электропотребления (рис. 3) [12, 13]. Соответствующий метод выбирается на основе характера имеющихся данных и желаемого характера и уровня детализации прогнозов.

Если недостаточно ретроспективных данных необходимо применять методы экспертной оценки. Если ретроспективной информации достаточно и не требуется высокая точность прогнозной модели, то для построения быстрых прогнозов, не требующих дополнительной предобработки данных, можно применять простые в реализации и не требовательные к машинному времени статистические методы прогнозирования. Методы машинного обучения отличаются высокой точностью, специальными требованиями к качеству входных данных и более сложной реализацией [14]. Зачастую предобработка данных, построение обучающей выборки требуют больше внимания по сравнению с непосредственной реализацией модели машинного обучения. Комбинированные методы включают методы с информационной базой разного типа, в которой наряду с качественной и количественной информацией используются экспертные оценки. Комбинация таких методов обеспечивает самую высокую точность прогноза. В задачах построения моделей по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления возможно использование методов всех представленных групп [12].

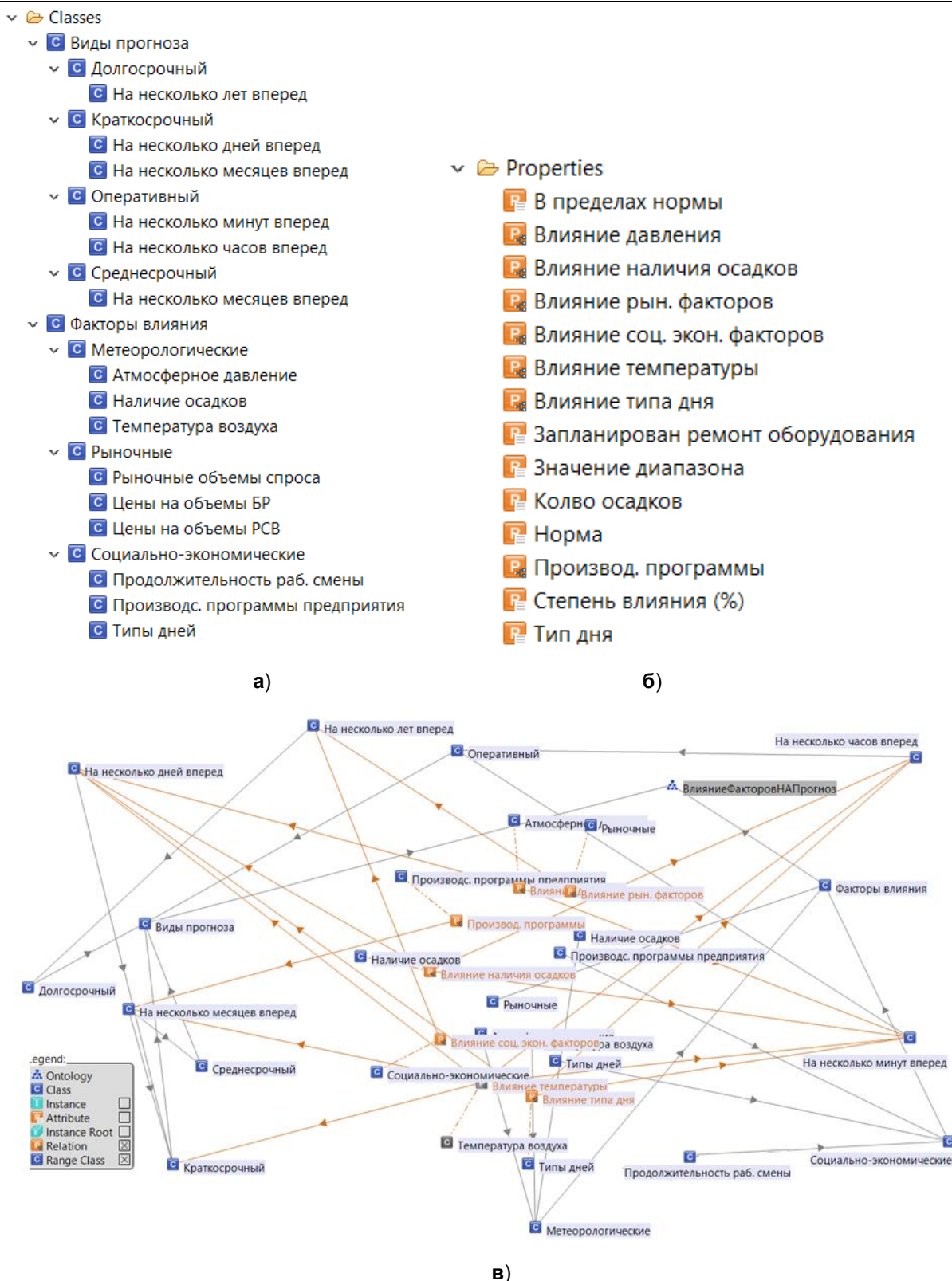


Рис. 2. Онтология факторов влияния и видов прогнозирования электропотребления: **а** – дерево классов онтологии; **б** – пример отображения сущности; **в** – визуализация онтологии

Fig. 2. Ontology of influence factors and types of power consumption forecasting: **a** – ontology classes tree; **b** - an example of displaying an entity; **v** – ontology visualization



Рис. 3. Классификация методов прогнозирования электропотребления

Fig. 3. Classification of methods for power consumption forecasting

Для построения прогноза РСВ необходимо иметь данные из различных источников. Информационной базой для анализа могут быть данные Метеоцентра (по температуре, наличию осадков, атмосферному давлению), а также ретроспективные данные фактических объемов электропотребления за предыдущие периоды, хранящиеся в базе данных корпоративной системы энергосбытовой компании. Энергосбытовые компании используют различные корпоративные решения для организации работы с ОРЭМ, хранения ретроспективных фактических объемов потребления [15]. Например, энергосбытовые компании, работающие в системе 1С, хранят информацию о фактическом потреблении в документах с заголовочной частью, включающей информацию о группе точек поставки, периодах и табличной, хранящей информацию о часах потребления, объеме. На основе рассмотренных принципов построения прогно-

зов электропотребления разработана структурная схема системы прогнозирования электропотребления на сутки вперед, включающая модели интеллектуального, системной динамики и экспертные (рис. 4).

В литературе описано использование различных программных сред для поддержки процесса прогнозирования электропотребления, включая такие настольные системы, как Excel и Matlab [16]. Однако математические пакеты не обладают полным набором средств для реализации комбинированных моделей, механизмами для консолидации данных, а также присутствуют ограничения на размер обрабатываемых массивов информации. Современные языки программирования, например Python, достаточно просты, но требуют кодирования, знания библиотек и фреймворков, что может быть более актуально для решения более уникальных задач.

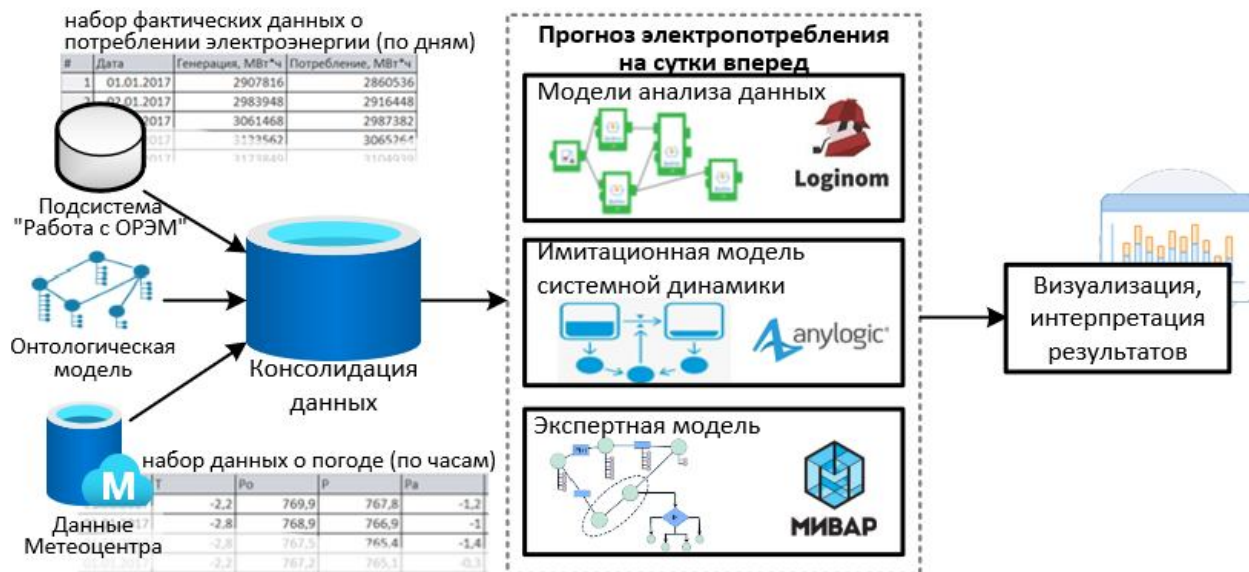


Рис. 4. Структура системы прогнозирования электропотребления

Fig. 4. The structure of the power consumption forecasting system

В настоящее время существуют риски использования иностранного программного обеспечения: отключение сервисов, непродление подписки, прекращение продаж и технической поддержки. Поэтому в качестве программного обеспечения для реализации процесса краткосрочного прогнозирования электропотребления в виде взаимодополняющей интеграции выбрано российское программное обеспечение в составе: аналитической low-code платформы Loginom [17], пакета имитационного моделирования Anylogic [18] и миварного конструктора экспертных систем Wi!Mi [19].

Результаты и их обсуждение

Наборы данных в систему интеллектуального анализа данных Loginom поступают из электронных таблиц, которые были выгружены с сайта Метеоцентра, содержащие информацию о по-

годе на конкретный день (или почасовые изменения, для построения почасового прогноза) и текстовых файлов, выгруженных из подсистемы «1С: Работа с ОРЭМ», содержащих данные о потреблении за прошлые периоды.

Модели прогнозирования электропотребления на основе Loginom. Сценарий формирования прогноза электропотребления в low-code системе Loginom содержит 2 основные подмодели: «Прогноз на сутки вперед-1» и «Прогноз на основе температуры» (рис. 5).

Прогнозирование с учетом влияния температуры начинается с предварительной обработки данных в подмодели «Обработка исходных данных по погоде» с использованием обработчиков «Дата и время», «Группировка» и «Сортировка» и состоит в формировании средних значений по метеоанализам для дальнейшего слияния с набором данных фактического электропотребления.

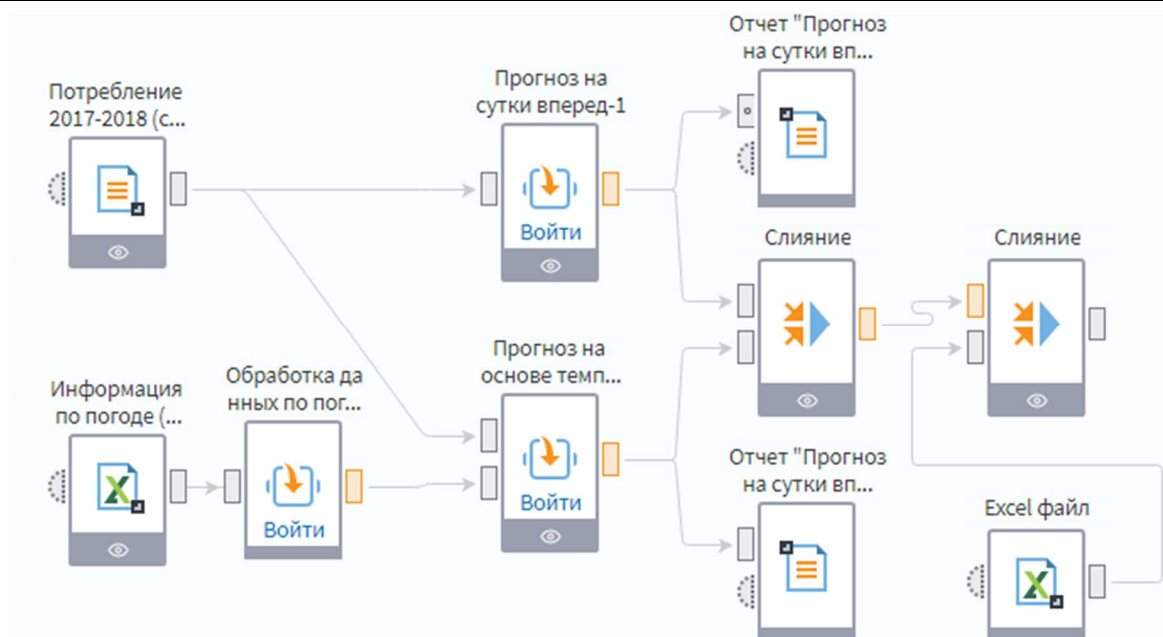


Рис. 5. Базовый сценарий прогнозирования элетропотребления в Loginom

Fig. 5. Loginom Basic Power Consumption Forecasting Scenario

Консолидация наборов метеоданных и фактическом потреблении электроэнергии происходит непосредственно в подмодели «Прогноз на основе температуры» (рис. 6). Далее осуществляется предобработка данных в виде: проверки на наличие пропусков, корректировки выбросов и экстремальных значений, а также применяется метод скользящего окна, который необходим в случаях, когда на вход анализатора (например, нейронной сети) требуется подавать значения нескольких смежных отсчетов исходного набора данных. В результате получается набор данных, содержащий в одном из полей значение, соответствующее текущему отсчету, а в соседних (слева и справа) полях значения, смещенные от текущего отсчета в прошлое и в будущее соответственно (см. рис. 6).

Для непосредственной реализации прогностических моделей были исполь-

зованы обработчики Loginom Нейросеть (регрессия) и ARIMAX (см. рис. 6). В обработчике Нейросеть (регрессия) формируется прогнозируемое значение переменной, зависимое от множества входных параметров. Перед прогнозированием внутренний алгоритм обработчика Нейросеть (регрессия) обучается на тренировочном наборе данных. Данные для тестового и обучающего множеств формируется из всего объема входных данных в случайном порядке в пропорции 30/70.

Параллельно используется обработчик ARIMAX, с помощью которого будут получены прогнозные значения объемов потребления (см. рис. 6). ARIMAX математическая модель для анализа временных рядов, объединяющая в себе интегрированную авторегрессию, скользящее среднее и возможность учета дополнительных внешних факторов. После

получения прогнозных данных происходит слияние таблиц для сравнения полученных данных. Результирующее множество сравнено с данными фактического потребления и увидеть, при этом ре-

зультат прогнозирования на основе алгоритма ARIMAX оказался более приближен к реальному (рис. 7). По подобному алгоритму строится прогноз без учета метеофакторов.

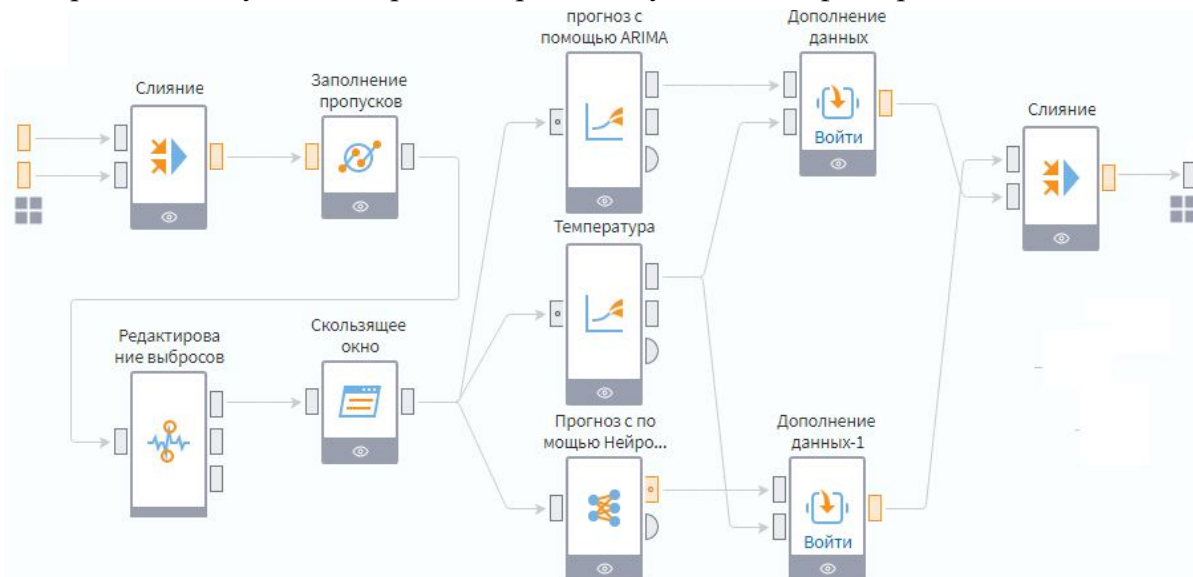


Рис. 6. Сценарий подмодели «Прогноз на основе температуры» в Loginom

Fig. 6. Loginom Temperature Prediction Submodel Scenario

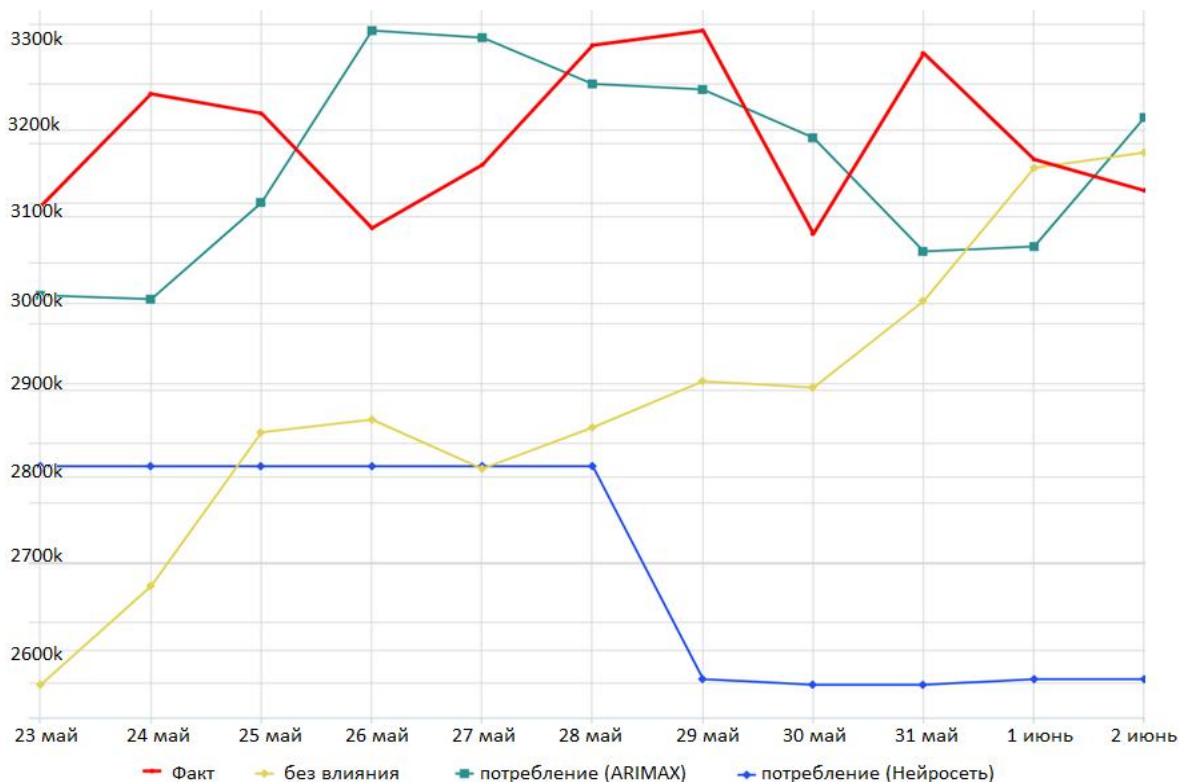


Рис. 7. Визуализация результатов прогнозирования в Loginom

Fig. 7. Loginom forecasting results visualization

Имитационная модель системной динамики прогнозирования электропотребления в Anylogic. В имитационной модели системной динамики были ис-

пользованы следующие объекты: параметры, динамические переменные, накопители, бегунки для изменения показателей (табл. 1-3).

Таблица 1. Параметры модели

Table 1. Model parameters

Свойства / Properties	Значение / Value
Имя Связан с Max значение Min значение	Температура параметр T +40 -30
Имя Связан с Max значение Min значение	Давление параметр P 764 750
Имя Связан с Max значение Min значение	Осадки параметр O 100 0,01
Имя Связан с Max значение Min значение	Пр_Объем параметр V_{last} 1 570 000 400 000

Таблица 2. Динамические переменные

Table 2. Dynamic variables

Свойства / Properties	Значение / Value
Имя Формула	$F3$ $(P == 761 \parallel P < 755) ? +1 : -1$
Имя Формула	$F2$ $(O > 60) ? +1 : -1$
Имя Формула	$F1$ $(T < 0 \parallel T > 30) ? +1 : -1$

Таблица 3. Свойства накопителя

Table 3. Drive properties

Свойства / Properties	Значение / Value
Имя Тип Формула Начальное значение	V Накопитель $(V > (V_{last} - 100000) \&\& V < (V_{last} + 100000)) ? \exp(F3+F2+F1) : \text{triangular}(V_{last}-100000, V_{last}, V_{last}+100000)$ V_{last}

Входными данными для модели системной динамики являются показатели температуры, давления, количества осадков, а также потребленный объем электрической энергии за прошлый период (от нескольких дней/месяцев до прогнозируемой даты). В процессе моделирования показатели можно изменять, тем самым изменяя результат [20]. В ходе за-

пуска модели были выставлены такие характеристики, которые могли бы повлиять на рост значения. Например, температура воздуха достаточно высокая, что и будет влиять на рост объема потребления, также при уменьшении температуры воздуха в нормальное состояние привело значение к минимальному отклонению от текущего (рис. 8).

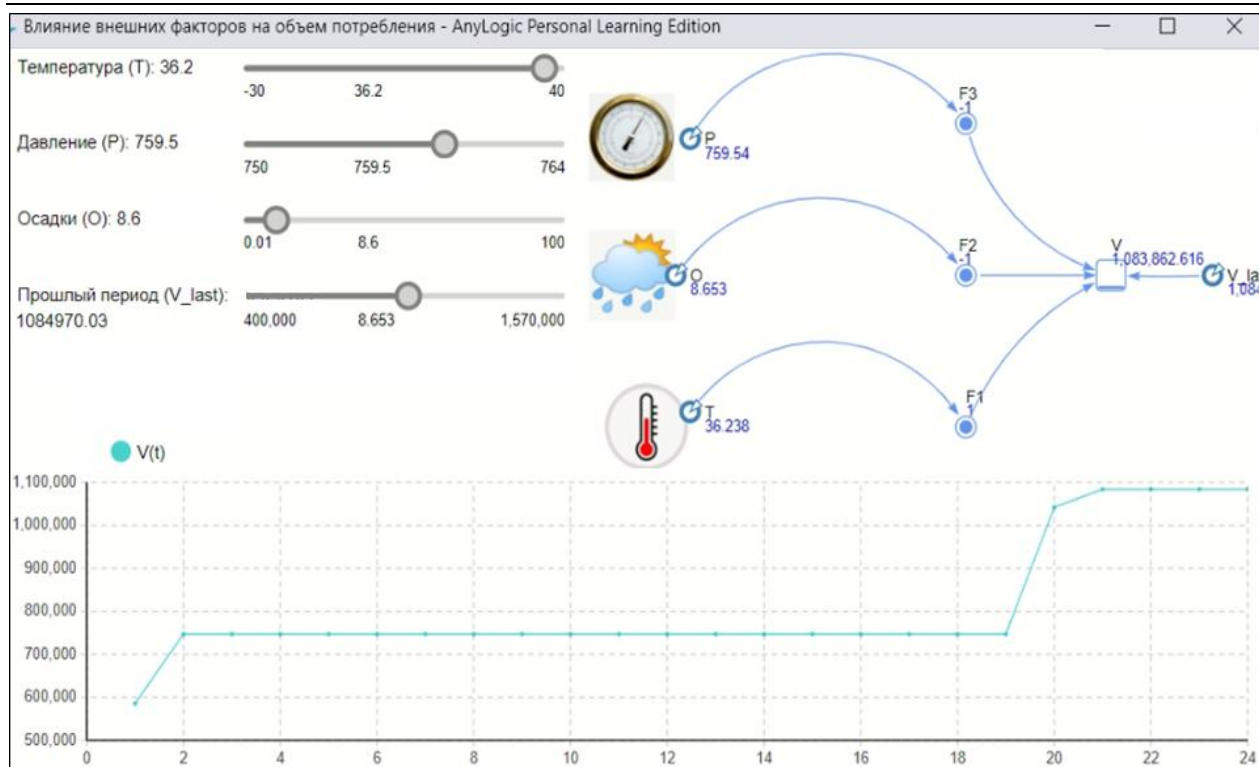


Рис. 8. Модель системной динамики влияния метеофакторов на объем элетропотребления в Anylogic

Fig. 8. Anylogic system dynamics model of the influence of meteorological factors on power consumption

Экспертные модели прогнозирования электропотребления в Wi!Mi. Ми-варный конструктор экспертных систем Wi!Mi позволяет создавать объекты предметной области (параметры и классы), отношения и правила, а также выполнять структурный анализ, вывод полученного алгоритма логического вывода разрешения ситуации, расчет необходимых значений. Данные параметры выделены в ходе онтологического анализа предметной области (см. рис. 2). В качестве конечных показателей определены показатели метеофакторов (рис. 9, а). Для описания логики расчета конечных показателей на основании входных па-

раметров использованы продукционные отношения вида «если..., то... иначе...», содержащие математические выражения и правила, привязывающие отношения к конкретным объектам (рис. 9, б, табл. 4).

Для каждого отношения прописывались правила, их входные и выходные параметры (табл. 4).

После создания структуры экспертной модели произведен расчет искомых параметров с пошаговым логическим выводом с указанием входных параметров, использованных правил путем нахождения алгоритмов вычисления и построена модель в виде графа решения, отображающая логику вычисления показателей (рис. 10).

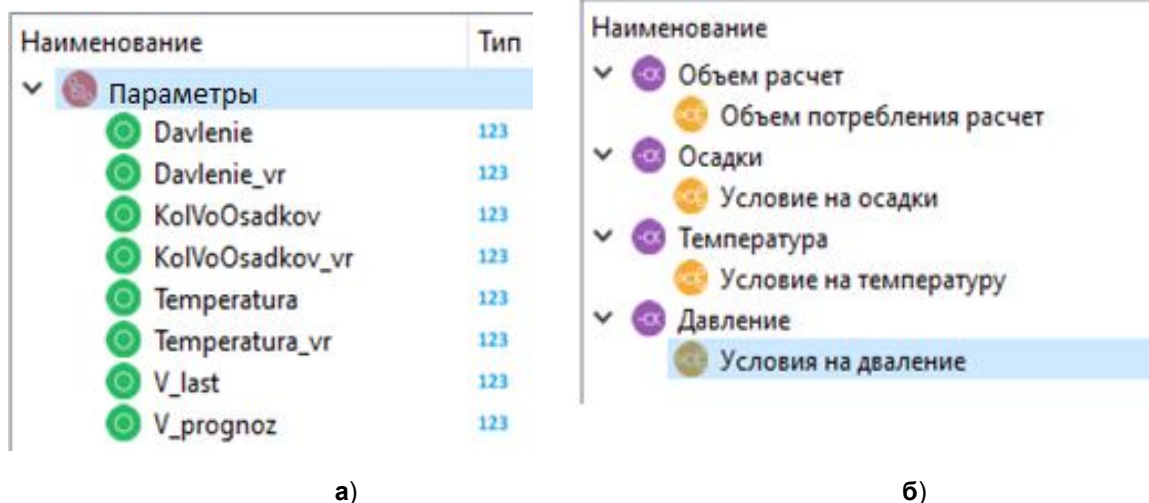


Рис. 9. Конечные показатели, правила и отношения экспертной модели в Wi!Mi:
а – конечные показатели; **б** – правила и отношения

Fig. 9. Final indicators, rules and relationships of the Wi!Mi expert model: **a** – final indicators;
b – rules and relationships

Таблица 4. Отношения экспертной модели

Table 4. Expert Model Relationships

Наименование / Name	Тип отношения / Relationship type	Тело отношения / Relationship body
Объем расчет	Условное отношение	if (V_last<400000 V_last>1500000) {V_pr=V_last* Math.sqrt(osadki+davlenie+temperatura);} else {V_pr=V_last*Math.exp(osadki+davlenie+temperatura);}
Осадки	Условное отношение	if (KolvoOsadkov>60) {KolvoOsadkov_vr = KolvoOsadkov_vr+1;} else {KolvoOsadkov_vr = KolvoOsadkov_vr-1;}
Температура	Условное отношение	if (Temperatura< 0 Temperatura >30) {Tempera- tura_vr=Temperatura_vr+1;} else {Tempera- tura_vr=Temperatura_vr-1;}
Давление	Условное отношение	if (Davlenie> 760 Davlenie<755) {Davlenie_vr = Davlenie_vr+1;} else {Davlenie_vr = Davlenie_vr-1;}

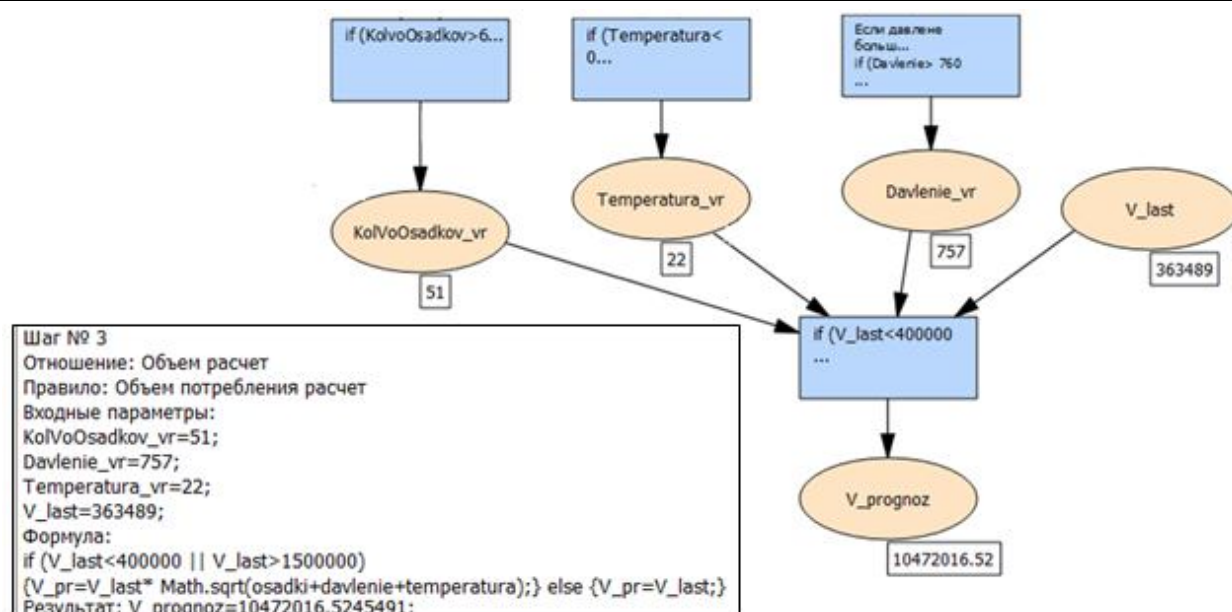


Рис. 10. Визуализация и результаты тестирования экспертной системы Wi!Mi

Fig. 10. Visualization and testing results of the Wi!Mi expert system

Выводы

В работе обоснована актуальность использования комбинированных моделей и различного типа прикладных программных средств для краткосрочного прогнозирования электропотребления. Разработана онтологическая модель влияния внешних факторов и видов прогнозирования электропотребления, систематизированы термины, выделены классы и сформирован тезаурус рассматриваемой предметной области. Предложена структурная схема на основе взаимодополняющей интеграции

моделей и программных средств интеллектуального анализа данных, имитационного моделирования и экспертных систем. Детально описаны реализованные сценарии прогнозирования электропотребления в low-code системе Loginom, диаграммы потоков влияния внешних факторов модели системной динамики в пакете имитационного моделирования Anylogic, а также граф решения в миварном конструкторе экспертных систем Wi!Mi. Построена визуализация каждой модели.

Список литературы

1. Оптовый рынок электрической энергии и мощности // Ассоциация «НП Совет рынка». URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm> (дата обращения: 14.04.2022)
2. По кривой – к балансу. Как складывается цена электроэнергии // ООО «Сибирская генерирующая компания». <https://sibgenco.online/news/element/on-a-curve-to-balance-what-is-the-price-of-electricity/> (дата обращения: 14.04.2022)

3. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды // Научный диалог. 2013. № 7 (19). С. 97-113.
4. Смирнова Е.О., Филатов А.Ю. Прогнозирование рынка электроэнергии "на сутки вперед": пример второй ценовой зоны // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2018. № 4. С. 149-159.
5. Мохов В.Г., Демьяненко Т.С. Прогнозирование потребления электрической энергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2014. Т. 8. № 2. С. 86-92.
6. Воронов И.В., Политов Е.А., Ефременко В.М. Использование нейронной сети для краткосрочного прогнозирования электропотребления промышленного предприятия // Вестник КузГТУ. 2006. № 6. С. 71-73.
7. Серебряков Н.А. Выбор оптимальной архитектуры и конфигурации нейросети в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 2 (64). С. 26-42.
8. Карпенко С.М., Карпенко Н.В., Безгинов Г.Ю. Прогнозирование электропотребления на горнопромышленных предприятиях с использованием статистических методов // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 82-88.
9. Использование статистических моделей при краткосрочном прогнозировании электропотребления и графиков нагрузки ЭЭС / Т.А. Филиппова, А.Г. Русина, Ю.В. Дронова, Р.В. Зимин, Р.С. Калюжный // Электрические станции. 2008. №5. С. 32-36.
10. Прогнозирование электропотребления энергосбытовых компаний / Б.И. Макоклюев, А.С. Полижаров, А.А. Ломейко, В.В. Мишина // Энергоэксперт. 2018. № 1 (65). С. 34-38.
11. Бершадский И.А., Джуря С.Г., Чурсинова А.А. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования электропотребления энергосбытовой компании // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 4 (80). С. 7-16.
12. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация / Д.А. Тюньков, А.А. Сапилова, А.С. Грицай, Д.А. Алексеенко, Р.Н. Хамитов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3 (48). С. 4-10.
13. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) / А.М. Абдурахманов, М.В. Володин, Е.Ю. Зыбин, В.Н. Рябченко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 1. С. 3-23.

14. Хальясмаа А.И., Матренин П.В., Ерошенко С.А. Анализ ошибок применения алгоритмов машинного обучения в задачах электроэнергетики // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 3 (66). С. 46-53.

15. Бубновская Т.В., Демонова Т.И. Совершенствование системы информационного обеспечения процессов управления в энергосбытовой компании // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2018. Т. 7. № 4 (25). С. 89-92

16. Кретов Д.А., Рузанов Р.В. Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-1 (35). С. 20.

17. Паклин Н.Б., Ильин И.В., Широкова С.В. Малокодовые платформы в подготовке аналитиков данных // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции. СПб., 2021. С. 218-221.

18. Борщев А.В., Махдави А. Имитационные модели как виртуальная среда для обучения и тестирования искусственного интеллекта для бизнес-приложений // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности: труды конференции. Екатеринбург, 2019. С. 20-29.

19. Назаров К.В., Варламов О.О. Разработка методики создания верифицируемых моделей для миварных экспертных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 64-71.

20. Ганюков В.Ю., Ханова А.А., Сульдина Н.В. Интеллектуальная система управления цепями поставок логистического предприятия на основе дискретно-событийной, агентной и системно-динамической имитационных моделей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 143-149.

References

1. Optovyy rynek jelektricheskoy jenergii i moshhnosti [Wholesale market of electric energy and capacity]. *Associacija «NP Sovet rynka»* [Association "NP Market Council"]. Available at: www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm (accessed date: 14.04.2022).

2. Po krivoj – k balansu. Kak skladyvaetsja cena jelektrojenergii [By curve - to the balance sheet. How is the price of electricity]. *ООО «Sibirskaja generirujushhaja kompanija»* [Sibirskaya Generating Company LLC]. Available at: www.sibgenco.online/news/element/on-a-curve-to-balance-what-is-the-price-of-electricity/ (accessed date: 14.04.2022).

3. Solovyova I.A., Dziuba A.P. Prognozirovanie jelektropotreblenija s uchetom faktorov tehnologicheskoy i rynochnoj sredy [Forecasting of power consumption taking into account

the factors of the technological and market environment]. *Nauchnyj dialog = Scientific Dialogue*. 2013, no 7 (19), pp. 97-113.

4. Smirnova E.O., Filatov A.Yu. Prognozirovanie rynka jelektroenergii "na sutki vpered": primer vtoroj cenovoj zony [Forecasting the electricity market "for the day ahead": an example of the second price zone]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jekonomika i upravlenie = Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Governance*, 2018, no. 4, pp. 149-159.

5. Mokhov V.G., Demyanenko T.S. Prognozirovanie potreblenija jelektricheskoy jenerгии na optovom rynke jelektroenergii i moshhnosti [Forecasting of electric energy consumption in the wholesale electricity and capacity market]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jekonomika i menedzhment = Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 86-92.

6. Voronov I.V., Politov E.A., Efremenko V.M. Ispol'zovanie nejronnoj seti dlja kratkosrochnogo prognozirovaniya jelektropotreblenija promyshlennogo predpriyatija [Using a neural network for short-term forecasting of the power consumption of an industrial enterprise]. *Vestnik KuzGTU = Bulletin of KuzGTU*, 2006, no. 6, pp. 71-73.

7. Serebryakov N.A. Vybor optimal'noj arhitektury i konfiguracii nejroseti v zadachah kratkosrochnogo prognozirovaniya jelektropotreblenija garantirujushhego postavshhika jelektroenergii [Choosing the optimal architecture and configuration of the neural network in the tasks of short-term forecasting of the power consumption of the guaranteeing electricity supplier]. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja = News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2021, no. 2 (64), pp. 26-42.

8. Karpenko S.M., Karpenko N.V., Bezginov G.Yu. Prognozirovanie jelektropotreblenija na gornopromyshlennyh predpriyatiyah s ispol'zovaniem statisticheskikh metodov [Forecasting of power consumption at mining enterprises using statistical methods]. *Gornaja promyshlennost' = Mining Industry*, 2022, no. 1, pp. 82-88.

9. Filippova T.A., Rusina A.G., Dronova Yu.V., Zimin R.V., Kalyuzhny R.S. Ispol'zovanie statisticheskikh modelej pri kratkosrochnom prognozirovanii jelektropotreblenija i grafikov nagruzki JeJeS [Use of statistical models in short-term forecasting of power consumption and EES load plots]. *Jelektricheskie stancii = Electrical Stations*, 2008, no. 5, pp. 32-36.

10. Makoklyuev B.I., Polizharov A.S., Lomeiko A.A., Mishina V.V. Prognozirovanie jelektropotreblenija jenergosbytovykh kompani [Forecasting the power consumption of energy sales companies]. *Jenergojeksport = Energoexpert*, 2018, no. 1(65), pp. 34-38.

11. Bershadsky I.A., Dzhura S.G., Chursinova A.A. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta dlja prognozirovaniya jelektropotreblenija jenergosbytovoj kompanii [The use of artificial intelligence to predict the power consumption of an energy sales company]. *Nauchnyj*

vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University, 2020, no. 4(80), pp. 7-16.

12. Tyunkov D.A., Sapilova A.A., Gritsa.i A.S., Alekseenko D.A., Khamitov R.N. Metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vyrabotki jelektricheskoy jenerгии solnechnymi jelektrostancijami i ih klassifikacija [Methods of short-term forecasting of electric power generation by solar power plants and their classification]. *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы = Electrical Systems and Complexes*, 2020, no. 3(48), pp. 4-10.

13. Abdurakhmanov A.M., Volodin M.V., Zybin E.Yu., Ryabchenko V.N. Metody prognozirovaniya jelektropotrebleniya v raspredelitel'nyh setjah (obzor) [Methods for predicting power consumption in distribution networks (overview)]. *Jelektrotehnika: setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal = Electrical Engineering: Network Electronic Scientific Journal*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 3-23.

14. Halyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. Analiz oshibok primeneniya algoritmov mashinnogo obucheniya v zadachah jelektrojenergetiki [Analysis of errors in the application of machine learning algorithms in the problems of the electric power industry]. *Jelektrojenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electricity. Transmission and Distribution*. 2021, no. 3(66), pp. 46-53.

15. Bubnovskaya T.V., Demonova T.I. Sovershenstvovanie sistemy informacionnogo obespecheniya processov upravleniya v jenergosbytovoj kompanii [Improving the information support system for management processes in the energy sales company]. *Azimut nauchnyh issledovaniy: jekonomika i upravlenie = Azimut of Scientific Research: Economics and Management*. 2018, vol. 7, no. 4(25), pp. 89-92.

16. Kretov D.A., Ruzanov R.V. Prognozirovanie jelektropotrebleniya jenergosbytovoj kompanii s ispol'zovaniem iskusstvennoj nejronnoj seti [Forecasting the power consumption of an energy sales company using an artificial neural network]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2015, no 2-1(35), pp. 20.

17. Paklin N.B., Ilyin I.V., Shirokova S.V. Malokodovye platformy v podgotovke analitikov dannyh [Small-code platforms in the preparation of data analysts]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, jekonomiki i trgovli. Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy i uchebno-metodicheskoy konferencii* [Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade. Collection of works of the All-Russian scientific-practical and educational-methodological conference]. St. Petersburg, 2021, pp. 218-221.

18. Borshchev A.V., Makhdavi A. Imitacionnye modeli kak virtual'naja sreda dlja obucheniya i testirovaniya iskusstvennogo intellekta dlja biznes-prilozhenij [Imitation models as a virtual environment for training and testing artificial intelligence for business applications]. *Devjataja vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniju v nauke i promyshlennosti. Trudy konferencii* [Ninth All-

Russian scientific and practical conference on imitation modeling and its application in science and industry. Proceedings of the conference]. Ekaterinburg, 2019, pp. 20-29.

19. Nazarov K.V., Varlamov O.O. Razrabotka metodiki sozdanija verifitsiruemykh modelej dlja mivarnyh jekspertnyh system [Development of methodology for creation of verifiable models for mivar expert systems]. *T-Comm: Telekommunikacii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 64-71.

20. Ganyukov V.Yu., Khanova A.A., Suldina N.V. Intellektual'naya sistema upravleniya cepyami postavok logisticheskogo predpriyatiya na osnove diskretno-sobytijnoj, agentnoj i sistemno-dinamicheskoy imitacionnyh modelej [Intelligent supply chain management system of a logistics enterprise based on discrete-event, agent and system-dynamic simulation models]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics*, 2012, no. 2, pp. 143-149.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мекпеткалиева Амина Канатовна, магистрант, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: amina.mectepckalieva@yandex.ru

Amina K. Mekpetkalieva, Master's Student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: amina.mectepckalieva@yandex.ru

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: akhanova@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2693-8876>

Anna A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Astrakhan State Technical University, e-mail: akhanova@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2693-8876>

Аминул Любовь Борисовна, кандидат педагогических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: aminul.25@mail.ru

Lyubov B. Aminul, Cand of Sci. (Pedagogical), Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: amil.25@mail.ru

Исследование интеллектуальных элементов управления мобильным роботом и обеспечение информационной безопасности процесса его функционирования в динамической среде

М. В. Макаров ¹ ✉, А. В. Астафьев ¹, И. А. Семенов ¹

¹ Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
ул. Орловская, д. 23, г. Муром 602224, Российская Федерация

✉ e-mail: nauka-murom@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Представленное в данной статье исследование нацелено на установление и обоснование принципов эффективной инкорпорации интеллектуальных элементов системы управления мобильным роботом, функционирующим в условиях динамической среды существования. В качестве предмета исследования использовалась входящая в состав управления процедура одновременной локализации и картографирования. Критерием эффективности выступали показатели, связанные с обеспечением информационной безопасности процесса функционирования робота в реальных условиях эксплуатации.

Методы. Разработана и реализована методология экспериментального исследования программного исполнения процедуры одновременной локализации и картографирования в рамках задачи управления мобильным роботом. Объектом исследования выступала компьютерная модель абстрактного мобильного робота, выполняющего разведывательные функции в виртуальной динамической среде существования. Инкорпорируемыми элементами интеллектуальной обработки информации в процедуру одновременной локализации и картографирования были сверточные и полносвязные нейросетевые слои, обеспечивающие фильтрацию динамических объектов.

Результаты. При проведении экспериментального исследования выполнена симуляция процесса функционирования компьютерной модели разведывательного мобильного робота в виртуальной среде существования. Аналогичные эксперименты воспроизведены при различных структурно-функциональных конфигурациях процедуры одновременной локализации и картографирования. Получены количественные результаты, демонстрирующие точность позиционирования объекта исследования для каждого из способов организации данной процедуры. Проведен сравнительный анализ вариантов использования элементов интеллектуальной обработки информации внутри данной процедуры.

Заключение. Установлено, что инкорпорация элементов интеллектуальной обработки информации в процедуру одновременной локализации и картографирования имеет влияние на точность позиционирования мобильного робота и надежность его функционирования в динамической среде существования. Это вносит вклад в соблюдение норм информационной безопасности при использовании мобильных роботов в реальных условиях эксплуатации. Также определено, что существует и их избыточное употребление, которое приводит к отклонению от оптимальных качеств, необходимых для эффективного автономного управления мобильным роботом и обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность; интеллектуальная обработка информации; автономное управление; мобильные роботы; одновременная локализации и картографирования.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00951.

Для цитирования: Макаров М. В., Астафьев А. В., Семенов И. А. Исследование интеллектуальных элементов управления мобильным роботом и обеспечение информационной безопасности процесса его функционирования в динамической среде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 72-86. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-72-86>.

Поступила в редакцию 08.06.2022

Подписана в печать 23.06.2022

Опубликована 29.07.2022

The Study of Intelligent Control Elements of a Mobile Robot and Ensuring Information Security of the Process of Its Functioning in a Dynamic Environment

Mikhail V. Makarov ¹ ✉, Alexandr V. Astafiev ¹, Ivan A. Semenov ¹

¹ Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs
23 Orlovkaya str., Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: nauka-murom@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The study presented in this article is aimed at establishing and substantiating the principles of effective incorporation of intelligent elements of the control system of a mobile robot operating in a dynamic environment. The subject of the study was the procedure of simultaneous localization and mapping involved in the control. Indicators related to ensuring the information security of the process of robot functioning in real operating conditions were used as the performance criterion.

Methods. A methodology for the experimental study of the software procedure execution for simultaneous localization and mapping within the framework of the task of controlling a mobile robot has been developed and implemented. The main focus of the study is a computer model of an abstract mobile robot performing reconnaissance functions in a virtual dynamic environment. The incorporated elements of intelligent information processing into the procedure of simultaneous localization and mapping are convolutional and fully connected neural network layers that provide filtering of dynamic objects.

Results. When conducting this experimental study, a simulation of the process of functioning of a computer model of a reconnaissance mobile robot in a virtual environment has been performed. Similar experiments have been reproduced with various structural and functional configurations of the procedure for simultaneous localization and mapping. Quantitative results have been obtained, demonstrating the accuracy of positioning the subject of the study for each of the methods of organizing this procedure. A comparative analysis of the options for using the elements of intelligent information processing within this procedure has been carried out.

Conclusion. It has been established that incorporation of the elements of intelligent information processing into the procedure of simultaneous localization and mapping has an impact on the positioning accuracy of a mobile robot and

the reliability of its functioning in a dynamic environment. This contributes to the compliance with information security standards when using mobile robots in real operating conditions. It is also determined that there is their excessive use, which leads to a deviation from the optimal qualities necessary for effective autonomous control of a mobile robot and information security provision.

Keywords: *information security; intelligent information processing; autonomous control; mobile robots; simultaneous localization and mapping.*

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

Funding: *The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-07-00951.*

For citation: Makarov M. V., Astafiev A. V., Semenov I. A. The Study of Intelligent Control Elements of a Mobile Robot and Ensuring Information Security of the Process of Its Functioning in a Dynamic Environment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 72-86 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-72-86>.

Received 08.06.2022

Accepted 23.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Применение мобильных роботов для решения большого круга актуальных прикладных задач предполагает их функционирование в реальной обстановке при непосредственном контакте с людьми и другими статическими и динамическими объектами [1, 2]. Одновременно с этим, важным аспектом эффективности решения этих задач является снижение участия человека в управлении данными техническими системами. Появляется необходимость реализации внутри них дополнительных функций, важных для автономного функционирования, с возможностью изучения среды существования и составления своего внутреннего представления о ней. Это значительно усложняет процесс управления, который при использовании строгих алгоритмических методов обработки информации не проявляет в достаточной степени свойства автономности.

Перспективы устранения обозначенной проблемы связаны с применением методов интеллектуальной обработки информации в случае решения трудноформализуемых структурно-функциональных задач, составляющих процесс управления [3-7]. Предполагается, что такой подход внесет существенный вклад в дальнейшее развитие прикладного проблемно-ориентированного искусственного интеллекта и позволит создавать мобильные роботы с автономным управлением, которые будут обладать максимальными техническими характеристиками при функционировании в условиях естественной для человека среды существования.

В частности, при реализации автономного управления мобильным роботом важнейшим этапом является исполнение процедуры одновременной локализации и картографирования (в международном научном сообществе

известная под аббревиатурой SLAM). Как показывает практика, существует трудность решения данной задачи в реальных условиях эксплуатации, что связано со снижением точности позиционирования робота в оперативном пространстве по причине невозможности полного учёта жесткими алгоритмическими методами динамической объектов среды существования робота.

Получившие распространение методы интеллектуальной обработки информации основаны на регрессии множественного прецедентного опыта. Предполагается, что данными средствами возможно точное перестроение SLAM-модели в реальном режиме времени, что способствует воссозданию системы управления поведенческих функций, адекватных условиям высокой вероятности изменения функциональных зависимостей, являющихся основой для работы робота в рамках своих компетенций.

Однако границы применимости этих методов с точки зрения обеспечения информационной безопасности до сих пор в полной мере не определены. Есть вероятность, что обработка информации происходит в условиях недостоверности информации, её неполноты или содержащихся в ней противоречий и какие принципы инкорпорации средств интеллектуальной обработки информации будут оптимальными с точки зрения соблюдения информационной безопасности пока неизвестны.

Исходя из этого, очевидна потребность в проведении экспериментальных исследований, результаты которых могут стать основой для определения принципов инкорпорации в процессы обработки информации интеллектуальных элементов для обеспечения процедуры одновременной локализации и картографирования в рамках автономного управления мобильным роботом в условиях динамической среды существования.

Материалы и методы

В качестве объекта экспериментального исследования использовалась компьютерная модель абстрактного мобильного робота, выполняющего разведывательные функции в виртуальном пространстве, динамическая природа которого заключается в наличии различного типа подвижных объектов. Требуется построение карты окружающей среды для её использования в рамках автономного управления роботом. Перемещение робота определяется двумя основными критериями, первый из которых – это нацеленность на получение максимальной информации о среде существования и встраивание этой информации в существующее представление о среде существования, представленной в системе в виде графической карты. Вторым критерием является недопустимость столкновения с любыми препятствиями.

Разработка алгоритма SLAM в данном случае особенно важна, так как ро-

бот не имеет предварительной информации об окружающей среде. На практике это может быть обусловлено недостаточной точностью спутникового пози-

ционирования. В таком случае место задачи SLAM в рамках автономного управления мобильным роботом представлено на рис. 1.

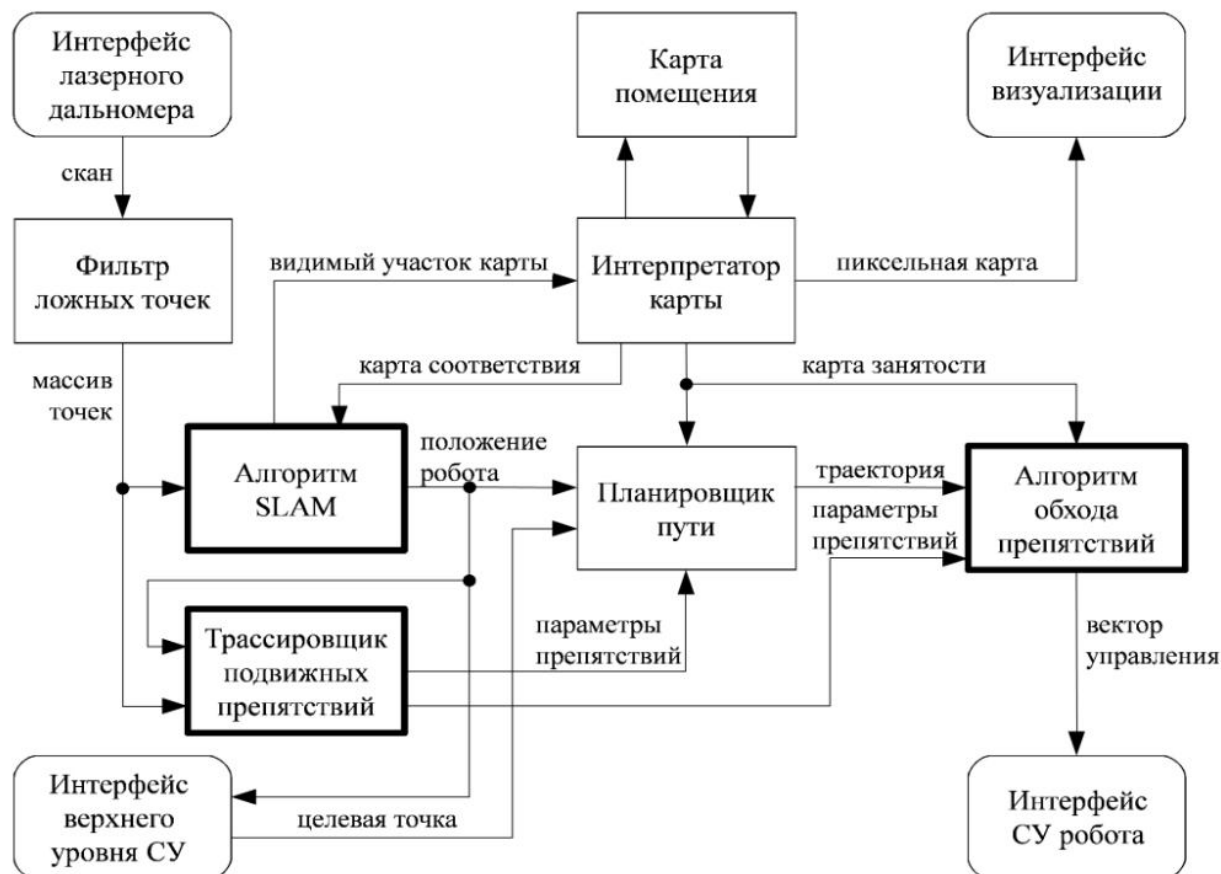


Рис. 1. Место процедуры SLAM в структурно-функциональной схеме процесса автономного управления мобильным роботом [6]

Fig. 1. SLAM procedure in a structural and functional scheme of the mobile robot autonomous control process [6]

Известно множество разновидностей алгоритмов [9, 10], которые могут достаточно эффективно решить задачу SLAM, однако они полагаются на гипотезу об оперативном пространстве, представляющем собой единое твердое тело и, следовательно, ни один объект не может перемещаться внутри него, а робот – единственный движущийся объект. Это положение, которое является ложным в большинстве сцен реаль-

ного мира, ограничивает сценарии, в которых может использоваться подобные алгоритмы. Данное исследование как раз ориентировано на присутствие движущихся объектов в оперативном поле робота, что свойственно большинству ситуаций его потенциального прикладного использования в реальной среде существования. Это создает сложности для классических алгоритмов SLAM и ограничивает их примени-

мость, поскольку они не могут точно оценить положение робота и структуру пространства во многих случаях.

Есть примеры того как в рамках классических методов SLAM [9] пытаются смягчить это предположение, используя оценки, позволяющие им помечать движущиеся объекты как выбросы. Однако, как только количество движущихся точек становится слишком большим, точность определения положения робота критически уменьшается. Это делает такой подход зачастую непригодным. Существуют некоторые примеры систем [11, 12] для обнаружения и маскировки динамических объектов на изображениях, что делает предположение о статической сцене обоснованным, но ожидается, что более выигрышным подходом будет использование методов интеллектуальной обработки информации, способных повысить недостаточную во многих случаях эффективность стандартных алгоритмов SLAM.

В проведенном исследовании базовым подходом к решению задачи SLAM был один из самых распространенных и производительных методов TinySLAM [13]. Однако сам по себе он не решает проблемы нарастания ошибки при наличии динамических объектов. Для устранения представленных недостатков авторами данной работы в состав базового метода были введены дополнительные алгоритмы обнаружения динамических объектов и нейросетевой фильтрации. Предполагалось, что использование выбранного базового ме-

тода позволит за счет оптимизации процесса обработки информации снизить энергоемкость решения задачи и приблизить интеллектуальное управление роботом к реальному времени, а применение фильтрации снизит влияние динамических объектов на результат SLAM.

Базовый алгоритм был реализован на C++ с использованием инструментов из библиотек с открытым исходным кодом: ROS, PCL (библиотека для работы с облаками точек), ndt omp (алгоритм регистрации облака точек), tf2 и Eigen (инструменты преобразования облаков точек и положения робота между различными системами координат) и g2o (для реализации графовой структуры алгоритма SLAM и оптимизации положения узлов после закрытия цикла). Открытый стандарт был использован для распараллеливания программ OpenMP и ускорения предлагаемого алгоритма фильтрации динамических объектов. ROS был выбран для передачи данных между предлагаемым алгоритмом SLAM и другими элементами мобильного робота.

Для реализации интеллектуальных элементов внутри алгоритма SLAM была использована сетка занятости [14]. Карта сетки занятости является хорошо зарекомендовавшей себя и популярной моделью среды из-за простой структуры и отсутствия предположений о моделях или формах объектов. Вместо этого они делят окружающую среду на небольшие ячейки сетки и оценивают свойства ячеек, например, состояние

занятости, на основе данных о дальности действия датчиков. В [15] выполнено расширение этого подхода до карты сетки динамической занятости (DOG), которая дополнительно оценивает скорость отдельных ячеек сетки с помощью фильтра частиц. Учитывая такой метод, решение о наличии движения в ячейке сетки в принципе может быть принято путем сравнения расчетной скорости с пороговым значением. Однако в некоторых случаях DOG ошибочно обнаруживает движение из-за шумных измерений в загроможденных областях пространства.

Ожидалось, что применение нейросетевого подхода позволит реализовать обнаружение движения, принимая во внимание эту пространственную структуру объектов на карте сетки, в дополнение к оценкам скорости на уровне ячеек. Для этого применялась полностью сверточная нейронная сеть (FCN) [16, 17], которая предсказывает, движутся ли отдельные ячейки сетки или нет, основываясь на различных сигналах в их окружении.

Цель интеллектуальной фильтрации динамических объектов – создать пиксельную классификацию карты DOG для поддержки обнаружения движущихся препятствий. Для этого DOG из [15] используется в качестве входных данных компонента классификации объектов.

Карта DOG должна была предварительно обрабатываться для извлечения входного изображения, оптимизированного для сверточного нейросетевого слоя (CNN). Затем эти входные данные передаются в полностью сверточную нейронную сеть (FCN), которая помечает динамические ячейки на карте сетки. Результат, полученный сетью, окончательно уточняется с помощью информации о занятости DOG, чтобы исключить ложные срабатывания.

Целевой набор состоит из двух классов: динамического (движущиеся объекты) и статического (неподвижные объекты), где фон является частью статического класса. Процесс классификации разделен на три этапа, как показано на рис. 2.

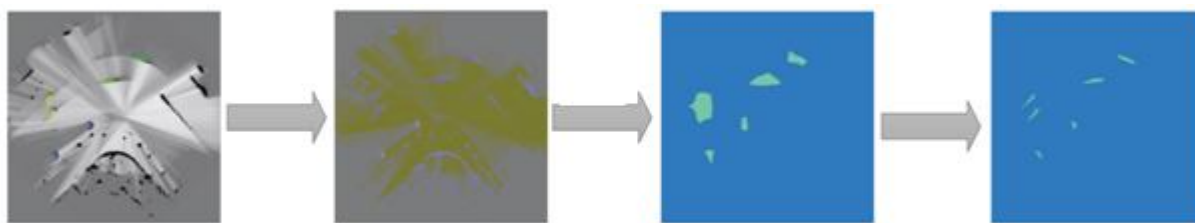


Рис. 2. Этапы нейросетевой обработки информации в разрабатываемом алгоритме SLAM

Fig. 2. Stages of neural network data processing in the developed SLAM algorithm

Сначала DOG подвергается предварительной обработке для получения

изображения, которое легче анализировать для CNN. Основываясь на этом

изображении, CNN делает вывод о классификации по пикселям. Наконец, вычисляется пересечение между сегментированным изображением и изображением занятых ячеек сетки для получения более четких границ маркировки и отклонения ложных срабатываний, которые появляются при маркировке незанятых ячеек сетки как динамических. Для решения задачи классификации на основе изображения карты сетки используются слои FCN, чтобы уменьшить вычислительно сложную задачу скользящих оконных подходов. Основываясь на работе [16], мы преобразуем две сетевые структуры (VGG-net [18] и Alexnet [19]) в FCN путем добавления деконволюционных слоев (также называемых слоями масштабирования). Это создает двумерный вывод сети и создает желаемую классификацию по пикселям, где размер входного и выходного изображения сети идентичен. Для инициализации весов CNN использовались предварительно обученные сети, чтобы сократить время обучения. Эти сети были обучены на общедоступном наборе данных Imagenet [20], который содержит цветные изображения различных категорий. Хотя эти входные данные сильно отличаются от данных нашей карты сетки, эта процедура помогает сократить время обучения и повысить производительность, поскольку фильтры нижних сверточных слоев содержат довольно общие представления форм, которые также отображаются на

картах сетки, т.е. большие двоичные объекты, линии и углы.

Результаты и их обсуждение

С точки зрения информационной безопасности, автономное управление мобильным роботом должно осуществляться с соблюдением требований надежности. В данном случае надежность в первую очередь связана с обеспечением условий успешного и безопасного для всех участников процесса исполнения роботом своих прикладных функций. Это зависит от множества факторов, но ключевым из них является точность обработки информации на всех этапах процесса управления.

В контексте рассматриваемой задачи SLAM подобным критерием надежности может считаться точность позиционирования робота. Именно эта процедура оказывает решающее воздействие на его правильную локализацию и качество описания внешней среды существования.

Разработанная и реализованная в данном исследовании методология была направлена на качественную характеристику принципов инкорпорации методов интеллектуальной обработки информации в процедуру SLAM и количественную оценку степени их влияния на точность решения этой задачи.

Данная методология включала в себя несколько этапов. На первом из них разработанная программная реализация базового (без применения методов ин-

теллектуальной обработки информации) алгоритма SLAM была проанализирована с точки зрения точности позиционирования робота. В качестве показателя точности выступало значение среднего отклонения координат определенной роботом его локализации от координат его реального расположения. После этого данные значения сравнивались с показателями точности, полученными при проведении аналогичного модельного эксперимента с использо-

ванием разработанного комбинированного алгоритма, включающего в себя нейросетевую процедуру фильтрации динамических объектов в оперативном поле функционирования робота. На рис. 3 представлена визуализация отрезка пути робота, который может послужить примером сопоставления истинной траектории (серая линия) перемещения робота, определенной алгоритмически (синяя линия) и определенной комбинированным методом (оранжевая линия).

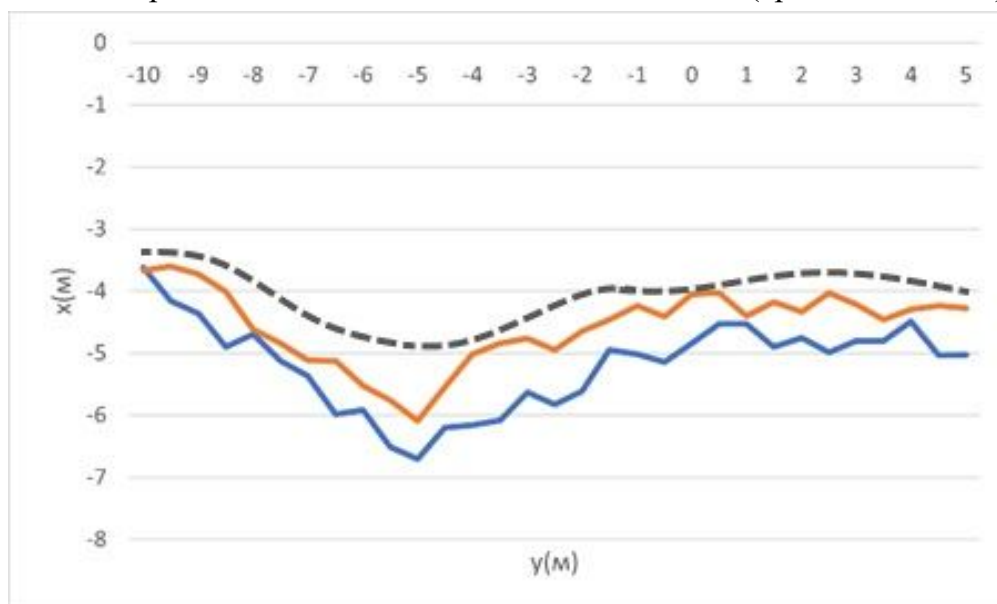


Рис. 3. Сопоставление точности позиционирования робота на отрезке его пути при различных вариантах алгоритмов SLAM

Fig. 3. Comparison of robot positioning accuracy on a segment of its path with different variants of the SLAM algorithms

Из рис. 3 мы можем увидеть, что применение элементов интеллектуальной обработки информации согласно вышеизложенным принципам позволило повысить точность позиционирования робота. Все количественные результаты проведенных множественных экспериментов в различных условиях подтверждают факт увеличения по срав-

нению с базовым алгоритмом SLAM точности позиционирования робота при наличии подвижных объектов в оперативном пространстве объекта исследования.

Что касается рассматриваемого вопроса границ применимости интеллектуальной обработки информации в задаче SLAM, то важным критерием в

данном случае будет оптимальность затрачиваемых вычислительных ресурсов на решение задачи. Был выполнен сравнительный анализ (рис. 4) загрузки процессора (в процентах) при симуляции четырех вариантов алгоритма SLAM: базовый (полностью алгоритмический), базовый без процедуры фильтрации, предлагаемый алгоритм с ограниченным применением нейросетевых технологий для фильтрации динамических объектов (комбинированный) и с расширенным применением интеллектуальной обработки информации (полностью нейросетевой).

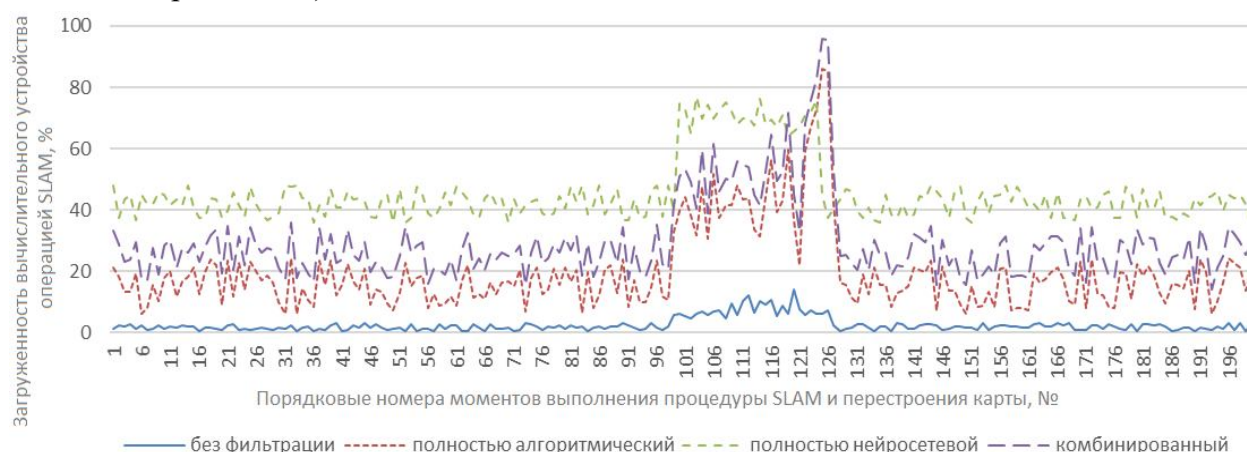


Рис. 4. Результаты исследования ресурсоемкости решения задачи SLAM

Fig. 4. Results of studying resource intensity of solving the SLAM task

Выводы

Таким образом, экспериментально установлено, что инкорпорация элементов интеллектуальной обработки информации в процедуру SLAM имеет влияние на точность позиционирования мобильного робота в динамической среде существования. Благодаря применению предложенного комбинированного алгоритма

Из графика, представленного на рис. 4, видно, что из всех апробированных вариантов применение комбинированного подхода дает выигрыш в производительности по сравнению с неограниченным нейросетевым подходом, позволяя повысить качество результирующей модели среды, успешно нивелируя негативное воздействие динамических объектов. Из этого следует, что необоснованное и излишнее применение нейросетевых вычислений негативно сказывается на ресурсоемкости исполнения процедуры SLAM.

ошибка позиционирования в среднем снизилась с 0.43% до 0.15%. Очевидно, что данное влияние оказывает положительный эффект на формирование основ автономного управления техническими объектами данного типа и способствует обеспечению требований по надежности их функционирования. Это является существенным вкладом в гарантию соблюдения норм информационной безопасности.

сти при использовании мобильных роботов для решения прикладных задач в реальных условиях эксплуатации.

Также определено, что существует и их избыточное употребление, стимулирующее неоправданный рост потребности в вычислительных ресурсах, что приводит к отклонению от оптимальных качеств, необходимых для эффективного автономного управления мобильным роботом. В частности, это стимулирует значительное увеличение энергопотребления и создает риск нарастания времени на обработку одного и того же объема информации, хотя минимизация энергоемкости вычисли-

тельных процессов и возможность функционирования в реальном режиме времени по понятным причинам являются обязательными условиями соблюдения информационной безопасности для автономных мобильных роботов. Применение комбинированного алгоритма SLAM позволяет найти баланс в данном вопросе и получить в среднем на 9-13% меньшую загруженность вычислительного устройства при исполнении процедуры SLAM по сравнению с расширенным применением средств интеллектуальной обработки информации в её составе при сопоставимой точности позиционирования.

Список литературы

1. Кабалан А., Гайдук А.Р., Абу Хамдан Н. Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 134-144. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.
2. Андронов В.Г., Чуев А.А., Князев А.А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 145-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.
3. Makarov M., Astafiev A. Synthesis of Special Operating Decisions as Part of Adaptive Control of a Mobile Robot // CEUR Workshop Proceedings. MIP: Computing-V 2022 – Proceedings of the 5th International Scientific Workshop on Modeling, Information Processing and Computing. 2022. 12-17. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip5/2022-3091-12-17>.
4. Panov A.I., Yakovlev K. Behavior and Path Planning for the Coalition of Cognitive Robots in Smart Relocation Tasks // Robot Intelligence Technology and Applications. 2015; 4: 3-20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31293-4_1.
5. Daachi B., Madani T. Adaptive Neural Networks and Robot Intelligent Control in Direct or Indirect Interaction with Humans. Amsterdam: Elsevier, 2019.
6. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
7. Lu H., Xu X. Artificial Intelligence and Robotics. Berlin: Springer; 2018.

8. Rudomanenko A.P., Vorotnikov S.A., Chernyadev N.A. Adaptive Control System for Industrial Robotic Manipulator // *Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1426 CCIS: 153-164. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88458-1_12.
9. Mur-Artal R., Tardos J.D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // *IEEE Trans. on Robotics*. 2017; 33(5): 1255-1262. <https://doi.org/10.1109/tro.2017.2705103>.
10. Engel J., Schops T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014; 834-849. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2_54.
11. DynaSLAM: Tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes / B. Bescos, J.M. Facil, J. Civera, J. Neira // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018; 3(4): 4076-4083. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2860039>.
12. DS-SLAM: A semantic visual SLAM towards dynamic environments / C. Yu, Z. Liu, X.-J. Liu, F. Xie, Y. Yang, Q. Wei, Q. Fei // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018; 1168-1174 <https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593691>.
13. Huletski A., Kartashov D., Krinkin K. TinySLAM improvements for indoor navigation // *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/mfi.2016.7849536>.
14. Elfes A., Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation // *IEEE Computer Magazine*. 1989; 22(6): 46-57. <https://doi.org/10.1109/2.30720>.
15. A Random Finite Set Approach for Dynamic Occupancy Grid Maps with Real-Time Application / D. Nuss, S. Reuter, M. Thom, T. Yuan, G. Krehl, M. Maile, A. Gern, K. Dietmayer // *The International Journal of Robotics Research*. 2018; 37(8): 841-866. <https://doi.org/10.1177/0278364918775523>.
16. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015; 3431-3440. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298965>.
17. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs / L.-C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, A.L. Yuille // *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.7062>.
18. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition // *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>.

19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Communications of the ACM*. 2017; 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.

20. ImageNet: A large-scale hierarchical image database / J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, L. Fei-Fei // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2009. <https://doi.org/10.1109/cvprw.2009.5206848>.

References

1. Kabalan A., Gaiduk A.R., Hamdan N. Upravlenie povorotami mobil'nogo robota, podobnogo avtomobilyu [Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2021; 25(4): 134-144. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>

2. Andronov V.G., Chuev A.A., Knyazev A.A. Model' parametrov otklonenii marshruta poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov ot zadannoi traektorii [Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2021; 25(4): 145-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

3. Makarov M., Astafiev A. Synthesis of Special Operating Decisions as Part of Adaptive Control of a Mobile Robot. *CEUR Workshop Proceedings. MIP: Computing-V 2022 – Proceedings of the 5th International Scientific Workshop on Modeling, Information Processing and Computing*. 2022. 12-17. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip5/2022-3091-12-17>.

4. Panov A.I., Yakovlev K. Behavior and Path Planning for the Coalition of Cognitive Robots in Smart Relocation Tasks. *Robot Intelligence Technology and Applications*. 2015; 4: 3-20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31293-4_1.

5. Daachi B., Madani T. *Adaptive Neural Networks and Robot Intelligent Control in Direct or Indirect Interaction with Humans*. Amsterdam: Elsevier; 2019.

6. Vorotnikov S.A. Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh sistem [Information devices of robotic systems]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2005.

7. Lu H., Xu X. *Artificial Intelligence and Robotics*. Berlin, Springer; 2018.

8. Rudomanenko A.P., Vorotnikov S.A., Chernyadev N.A. Adaptive Control System for Industrial Robotic Manipulator. *Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1426 CCIS: 153-164. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88458-1_12.

9. Mur-Artal R., Tardos J.D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras. *IEEE Trans. on Robotics*. 2017; 33(5): 1255-1262. <https://doi.org/10.1109/tro.2017.2705103>.

10. Engel J., Schops T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM. *Lecture Notes in Computer Science*. 2014; 834-849. [https://doi.org/ 10.1007/978-3-319-10605-2_54](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2_54).
11. Bescos B., Facil J.M., Civera J., Neira J. DynaSLAM: Tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018; 3(4): 4076-4083. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2860039>.
12. Yu C., Liu Z., Liu X.-J., Xie F., Yang Y., Wei Q., Fei Q. DS-SLAM: A semantic visual SLAM towards dynamic environments. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018; 1168-1174 <https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593691>.
13. Huletski A., Kartashov D., Krinkin K. TinySLAM improvements for indoor navigation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/mfi.2016.7849536>.
14. Elfes A., Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation. *IEEE Computer Magazine*. 1989; 22(6): 46-57. <https://doi.org/10.1109/2.30720>.
15. Nuss D., Reuter S., Thom M., Yuan T., Krehl G., Maile M., Gern A., Dietmayer K. A Random Finite Set Approach for Dynamic Occupancy Grid Maps with Real-Time Application. *The International Journal of Robotics Research*. 2018; 37(8): 841-866. <https://doi.org/10.1177/0278364918775523>.
16. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015; 3431-3440. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298965>.
17. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A.L. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.7062>.
18. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>.
19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017; 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.
20. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2009. <https://doi.org/10.1109/cvprw.2009.5206848>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Макаров Михаил Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых г. Муром, Российская Федерация, e-mail: nauka-murom@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-7657>, Researcher ID: M-9100-2015

Mikhail V. Makarov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: nauka-murom@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-7657>, Researcher ID: M-9100-2015

Астафьев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых г. Муром, Российская Федерация, e-mail: alexandr.astafiev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9095-5788>, Researcher ID: M-8060-2014

Alexandr V. Astafiev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: alexandr.astafiev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9095-5788>, Researcher ID: M-8060-2014

Семенов Иван Александрович, магистрант, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых г. Муром, Российская Федерация, e-mail: 79601712352.ru

Ivan A. Semenov, Master's Student, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: 79601712352@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-87-105>

Моделирование процесса автоматизации создания, проверки и актуализации текста договоров

А.А. Котов ¹ ✉, А.Л. Ронжин ¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 14 линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: alexanderkotovspb@gmail.com

Резюме

Цель исследования: повышение степени автоматизации правового сопровождения договорных отношений сторон на примере издательской деятельности за счет разработки модельно-алгоритмического и программного обеспечения автоматизированного создания и актуализации текста лицензионного договора между издательством и автором.

Методы. При анализе процессов автоматизации юридической деятельности применительно к созданию, разработке и актуализации текста договоров рассмотрены российские и иностранные технологии, программное обеспечение, позволяющие автоматизировать процессы договорной деятельности. Предложены концептуальная и теоретико-множественная модели процесса автоматизированного формирования текста договоров.

Результаты. Предложена оригинальная классификация задач и способов автоматизации юридической деятельности актуальных, включающая перечень перспективных информационных технологий. Разработаны концептуальная и теоретико-множественная модели процесса автоматизированного формирования текста договора, отличающиеся использованием в качестве источников информации множества публичных актов, информационных ресурсов, экспертной информации, доступных для создания необходимого документа в выбранной предметной области на основе алгоритма верификации данных, генерации, визуализации, обновления договора, обеспечивающих его создание и актуализацию в автоматизированном режиме. Разработана алгоритмическая модель автоматизированной обработки параметров договора, отличающаяся распределением задач между экспертами (юристом, программистом) и программными средствами на основных этапах жизненного цикла документа: создание, обновление, удаление договора, обеспечивающая на основе событийной модели проверку наличия обновлений в публичных актах и автоматическую коррекцию текстовых значений параметров договора. Предложенные решения апробированы на примере лицензионного договора между автором статьи и издательством средства массовой информации - журнала «Информатика и автоматизация».

Заключение. Разработка модельно-алгоритмического и программного обеспечения обработки текстовой информации, доступной из публичных актов, информационных ресурсов, предоставляемой субъектами предметных областей, необходимого для автоматизированного формирования, верификации и визуализации частных актов, способствует повышению степени автоматизации, скорости подготовки юридических документов, соответствующих требованиям действующих публичных актов. Средства автоматизации договорной деятельности должны быть построены на принципе открытости, обладать свойством динамичности, а также должны быть управляемы извне. Разрабатываемые в рамках данного исследования программные сервисы СПб ФИЦ РАН по автоматизации правовой деятельности размещены на <http://legaltech.viwo.ru/>.

Ключевые слова: конструктор договоров; legal tech; law tech; автоматизация договорной деятельности; автоматическая обработка текста.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ № 20-08-01109_А.

Для цитирования: Котов А.А., Ронжин А.П. Моделирование процесса автоматизации создания, проверки и актуализации текста договоров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 87-105. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-87-105>.

Поступила в редакцию 20.06.2022

Подписана в печать 12.07.2022

Опубликована 29.07.2022

Modeling the Automating Process of the Creation, Checking and Updating Texts of Contracts

Alexander A. Kotov ¹ ✉, Andrey L. Ronzhin ¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: alexanderkotovspb@gmail.com

Abstract

Purpose of research. is to increase the degree of automation of contractual relations legal support of the parties as in the case of publishing activities through the development of model-algorithmic control and software for the automated creation and updating of texts of publisher-author license agreements.

Methods. When analyzing the processes of automating legal activities in relation to the creation, development and updating texts of contracts, Russian and foreign technologies and software that allow automating the processes of contractual activities have been considered. Conceptual and set-theoretic models of the process of automated building texts of contracts have been proposed.

Results. An original classification of tasks and ways of automating the legal activities including a list of promising information technologies have been proposed. Conceptual and set-theoretic models of the process of automated building texts of contracts have been developed; they differ in the use of a set of public acts, information resources, and expert information available as sources of information to create the necessary document in the selected subject area based on the algorithm of data verification, generation, visualization, contract updating, which provide contract creation and updating in an automated mode. An algorithmic model for automated processing of contract parameters which differs in the distribution of tasks between experts (a lawyer, a programmer) and software tools at has been developed. The main stages of the document life cycle involve creating, updating, deleting a contract, which, based on the event model, checks for updates in public acts and automatically corrects the text values of the parameter of the contract. The proposed solutions have been tested in case of a license agreement between an author of the article and the publishing house issuing Informatics and Automation journal.

Conclusion. The development of model-algorithmic control and software for processing text information available from public acts, information resources provided by representatives of subject areas necessary for the automated generation, verification, and visualization of individual acts contributes to an increase in the degree of automation, reduces the time of preparation of legal documents that meet the requirements of existing public acts. Means of automating contractual activities should be built on the principle of openness, be dynamic, and also be externally controlled. The software services of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of

Sciences for the automation of legal activities developed within the framework of this study are available at <http://legaltech.vivo.ru/>.

Keywords: contract constructor; legal tech; law tech; automation of contractual activities; automatic text processing.

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

Funding: The work was carried out with the support of RFPI No. 20-08-01109_A.

For citation: Kotov A. A., Ronzhin A. L. Modeling the Automating Process of the Creation, Checking and Updating Texts of Contracts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 87-105 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-87-105>.

Received 20.06.2022

Accepted 12.07.2022

Published 29.07.2022

Введение

На сегодняшний день одним из направлений технологического развития является свободное распространение знаний и упрощение технических решений таким образом, чтобы они могли стать доступными для как можно более широкого круга лиц. В рамках данного направления активное развитие получило движение по code (zero code), low code¹, посредством которого пользователи, не обладая навыками программирования (или обладая минимальными навыками в случае low code), могут создавать готовые к использованию технические решения в области разработки игр, сайтов, создании приложений, автоматизации бизнес-процессов, тестирования, анализа данных и т.д.². Наиболее ярким примером

данных решений являются различной направленности конструкторы, такие как: конструкторы сайтов, чат-ботов, мобильных приложений. Данные решения построены на принципе шаблонизации, которая позволяет создавать типизированные блоки решений, комбинируя которые пользователь создает финальный результат. Юридическая сфера также не осталась в стороне. Применительно к автоматизации различных видов юридической деятельности каждый день появляются новые решения, что породило создание таких направлений, как legal tech [1] или law tech [2]. Для целей автоматизации договорной деятельности на сегодняшний день создано большое количество решений, обычно обозначаемых понятием «конструктор договоров» в разных странах и юрисдикциях. Посредством данных сервисов пользователи используют шаблоны договоров, в которые вносится необходимая информация применительно к конкретным правоотношениям, что позволяет конечному пользователю тратить значительно

¹ Understanding the Low-Code vs. No-Code Debate URL: <https://www.interfacing.com/low-code-vs-no-code-zero-code> (дата обращения 02.06.2022).

² Самая большая подборка сервисов и инструментов zero-code и low-code URL: <https://rb.ru/opinion/zero-and-low-code-podborka/> (дата обращения 02.06.2022).

меньше времени на создание договора, снизить риск допущения ошибок смыслового и технического характера, а также увеличить доступность сервиса для лиц, не имеющих юридического образования. В то же время данные сервисы позволяют его создателям распространить своё виденье толкования положений законодательства, юридических оговорок [3]. Функционал существующих «конструкторов договоров» значительно варьируется, что требует теоретического осмысления.

Фундаментом для разработки подходов, определивших возможность автоматизации юридической деятельности, послужили следующие дисциплины: правовой позитивизм [4], реализм [5], юриметрика [6], правовая кибернетика [7].

На рис. 1 проведен анализ наиболее актуальных задач автоматизации правовой деятельности, а также перечень информационных технологий, которые перспективно привлечь для их решения. Можно выделить три основных вида юридической деятельности: нормотворческая, судебная и договорная. Применительно к каждому из направлений приведены смысловые задачи автоматизации, которые не исчерпывают всех проявлений и объективных потребностей, а также возможных путей развития. Для решения задач автоматизации договорной деятельности могут быть использованы следующие информационные технологии: автоматическая обработка текста [8], машинный перевод

[9], информационные ресурсы [10], базы данных [11], интеллектуальный анализ данных [12], статистический анализ данных [13], визуализация данных [14], распознавание текста и образов [15-18], аудиовизуальный синтез текста и речи [19,20]. Они могут использоваться как сами по себе, так и в совокупности с другими технологиями, например при обработке естественного языка (Natural Language Processing) [21].

Исходя из задачи исследования, далее основное внимание уделено разработке способов автоматизации договорной деятельности и, в частности, правовому сопровождению работы издателя научного журнала с точки зрения законодательства о защите интеллектуальной собственности и персональных данных.

Конструкторы договоров получили широкое распространение как в России, так и за рубежом. Среди российских решений можно выделить: конструкторы договоров от справочных правовых систем (СПС) «Консультант Плюс» и «Гарант», банков «Сбербанк» и «Тиньков», компании «Юрайт», сервисов «Doczilla», «Freshdocs», «Embedika Contract», «Dogovor.ru», «Турбоконтракт». Развитию данных систем способствовали множество факторов, в том числе необходимость в ускорении процесса составления договоров, предоставление возможности людям без юридического образования выполнять простые правовые задачи, упорядочивание юридической базы знаний [22].

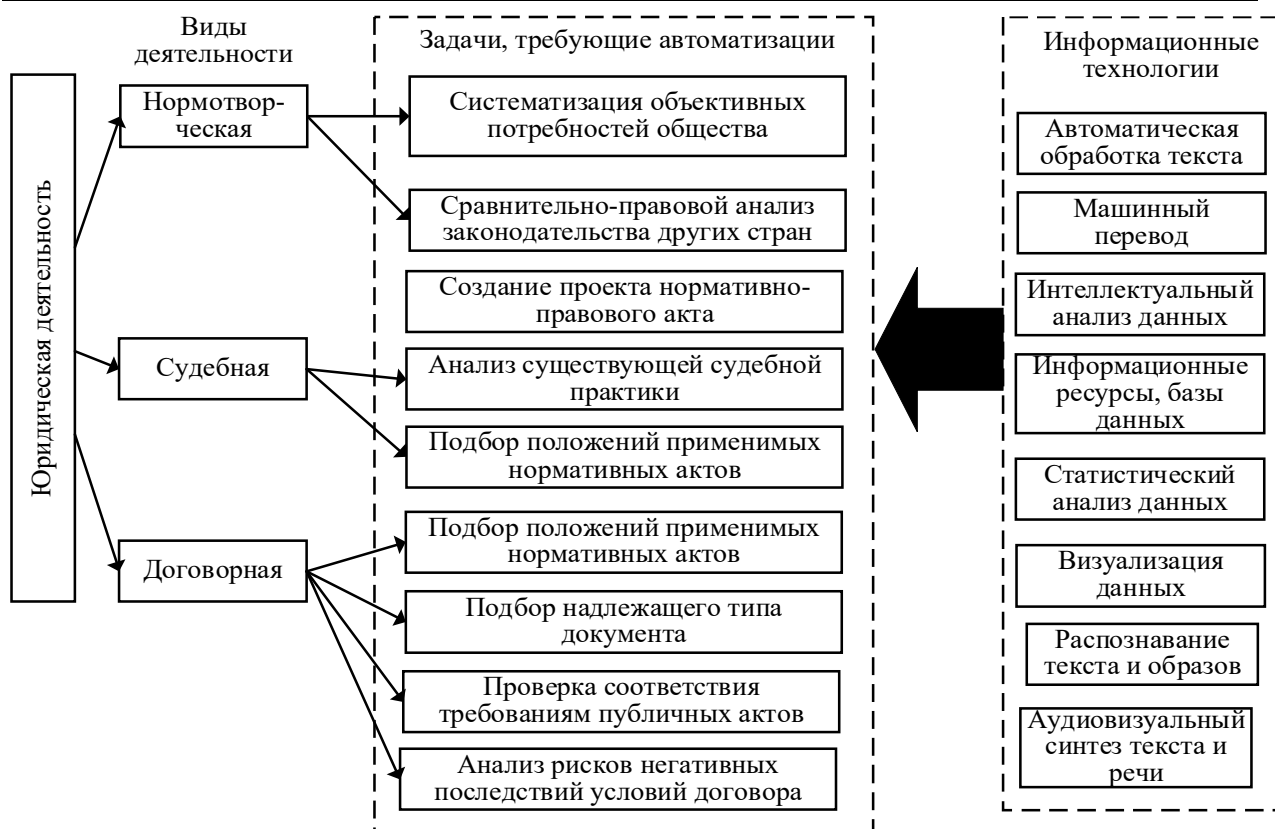


Рис. 1. Классификация задач и способов автоматизации юридической деятельности

Fig. 1. Classification of tasks and methods for legal activities automating

Конструкторы договоров от СПС в контексте функционала имеют преимущество в упрощенной интеграции баз данных, что позволяет упростить процесс актуализации текста договора, а также размещать рекомендации со ссылкой на конкретные положения статей закона, позиции регулятора, примеров из судебной практики посредством текстов с гиперссылками. При этом в данных сервисах не предусматривается возможности заключить договор в электронной форме посредством электронной подписи, взаимодействовать с контрагентом по согласованию условий договора в интерактивном режиме, отслеживать версии редакций договора,

возможность осуществлять управление совокупностью договоров, отсутствует система оповещения об истечении срока действия договоров, а также не предусмотрена возможность самостоятельного создания шаблона на основе имеющейся у пользователя совокупности документов.

Совокупность указанных функций или их часть можно обнаружить в иных имеющихся решениях. Так, посредством сервиса Embedika Compare можно проводить сравнения между версиями документов с наглядным выделением тех изменений, которые претерпела первоначальная версия документа (более удобная версия функционала, пре-

дусмотренного в word). Посредством сервиса Legium.io предоставляется возможность подписания договоров посредством простой электронной подписи (сервис удаленной идентификации). При помощи сервиса Lawyaw можно самостоятельно создавать шаблоны договоров на основе имеющихся у пользователя типовых документов при интеграции сервиса с Microsoft word. Сервис «Турбоконтракт» предоставляет возможность по управлению договорной деятельностью и согласованию формулировок в договоре с контрагентом. Сервис «Checkbox» позволяет отслеживать действующий статус договоров, а также использовать средства инфографики для презентации имеющихся результатов активности пользователей. В совокупности перечисленные функции представлены в наиболее близком к полному объему виде в сервисе под названием «Doczilla». Кроме того, имеются такие сервисы по работе с договорами и иными юридическими документами, которые позволяют выявлять наиболее релевантные юридические документы в базе пользователя при помощи технологии искусственного интеллекта, например «Disco AI».

Следует отметить, что ни в одном из рассмотренных сервисов не предусмотрено автоматизированной проверки имеющихся юридических документов на соответствие законодательным предписаниям. Максимум, что имеется на данный момент, представляет из себя юридически грамотную версию шабло-

на, который составили юристы для заполнения пользователем. Рекомендации по заполнению юридических документов, включая договоры, также являются заранее предписанными применительно к крайне узкому кругу вопросов. Также имеющиеся решения не предусматривают дифференциации относительно заполняемых пользователем полей и возможного указания на необходимость перепроверки положений договора специалистом – юристом. При этом в некоторых решениях напрямую отмечается, что не все части существующих документов можно превратить в шаблон, так как каждое из правоотношений является уникальным по фактической составляющей¹.

Материалы и методы

Рассмотрим разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение автоматизации договорной деятельности в качестве отправной точки для создания комплексного решения, учитывающего особенности функционала и недостатков, указанных выше. Для формализации автоматизированного формирования текста договора была предложена концептуальная модель (рис. 2), включающая следующие основные элементы: «информационные ресурсы», «публичные акты», «источники информации», «субъекты», «программно-алгоритмическое обеспечение», «элементы

¹ LAWYAW URL: <https://www.lawyaw.com/templates> (дата обращения 02.06.2022).

создаваемого договора», «участники договора». В качестве информационных ресурсов выступают справочно-правовые системы (например, СПС «Консультант Плюс»), официальные источники опубликования публичных актов (например, «Российская Газета»), официальные ресурсы органов исполнительной власти (например, сайт Роскомнадзора). К источникам информации относятся публичные акты, в которых содержатся правила, обязательные для исполнения каждым из субъектов правопорядка, а также экспертная информация. Экспертная информация является результатом юридической деятельности (база знаний) и автоматизированного анализа типовых текстов договоров, по результатам которой предпринимаются действия, направленные на снижение правовых рисков. Также выделены субъекты, оказывающие влияние на функционирование системы, начиная от процесса её создания, заканчивая семантическим наполнением и использованием. Среди них можно выделить следующие роли: ответственное лицо, юрист, программист и пользователь. Ответственное лицо осуществляет непосредственное управление проектом по созданию системы, ставит цель, предпринимает действия к постановке задач и контролю за их исполнением. Юрист осуществляет наполнение системы необходимыми знаниями и контролирует корректность выдаваемых результатов, кроме того, он может принимать участие в создании документа.

Программист осуществляет техническую реализацию системы в соответствии с учетом указаний ответственного лица и юриста, а также её последующую поддержку и модификацию. Конечный пользователь вводит необходимые данные, получает готовый результат, предоставляет обратную связь. Программно-алгоритмическое обеспечение, используемое для создания и функционирования системы, включает: алгоритмы ввода данных, алгоритмы анализа входных данных, алгоритмы пользовательского интерфейса ввода данных, алгоритмы верификации данных, алгоритмы генерации договора, алгоритмы пользовательского интерфейса визуализации генерируемого договора, программное обеспечение разработанных алгоритмов. Создаваемый по результатам функционирования системы договор определяется следующими элементами. Структура документа – в зависимости от типа создаваемого договора структура его текста подвергается изменению, добавляются новые поля, удаляются старые. В этой связи система предполагает использование разных шаблонов документа для того, чтобы адаптироваться к существенным изменениям текста при смене типа договора. Поля создаваемого договора также поделены, исходя из их возможного содержания, которым они наполняют содержание договора. Ключевое различие полей проявляется в необходимости их наличия и возможности их изменения. Исходя из этого, поля поде-

лены на следующие виды: обязательные неизменяемые поля (поле обязательно должно содержаться в тексте договора и его содержание не может быть изменено пользователем); обязательные вариативные поля (поле обязательно должно содержаться в тексте договора, его содержание определяется пользователем из заранее определенных вариантов); обязательные поля, заполняемые пользователем или юристом (поле обязательно должно содержаться в тексте

договора, его содержание определяет лицо, заполняющее поле в соответствии с его семантикой); рекомендуемые поля (поле необязательно должно содержаться в тексте договора, но для снижения правовых рисков, усиления позиции одной из сторон, система рекомендует его включить в текст договора); необязательные поля, требующие проверки юристом (поле, которое включается по усмотрению пользователя, с обязательным контролем со стороны юриста).

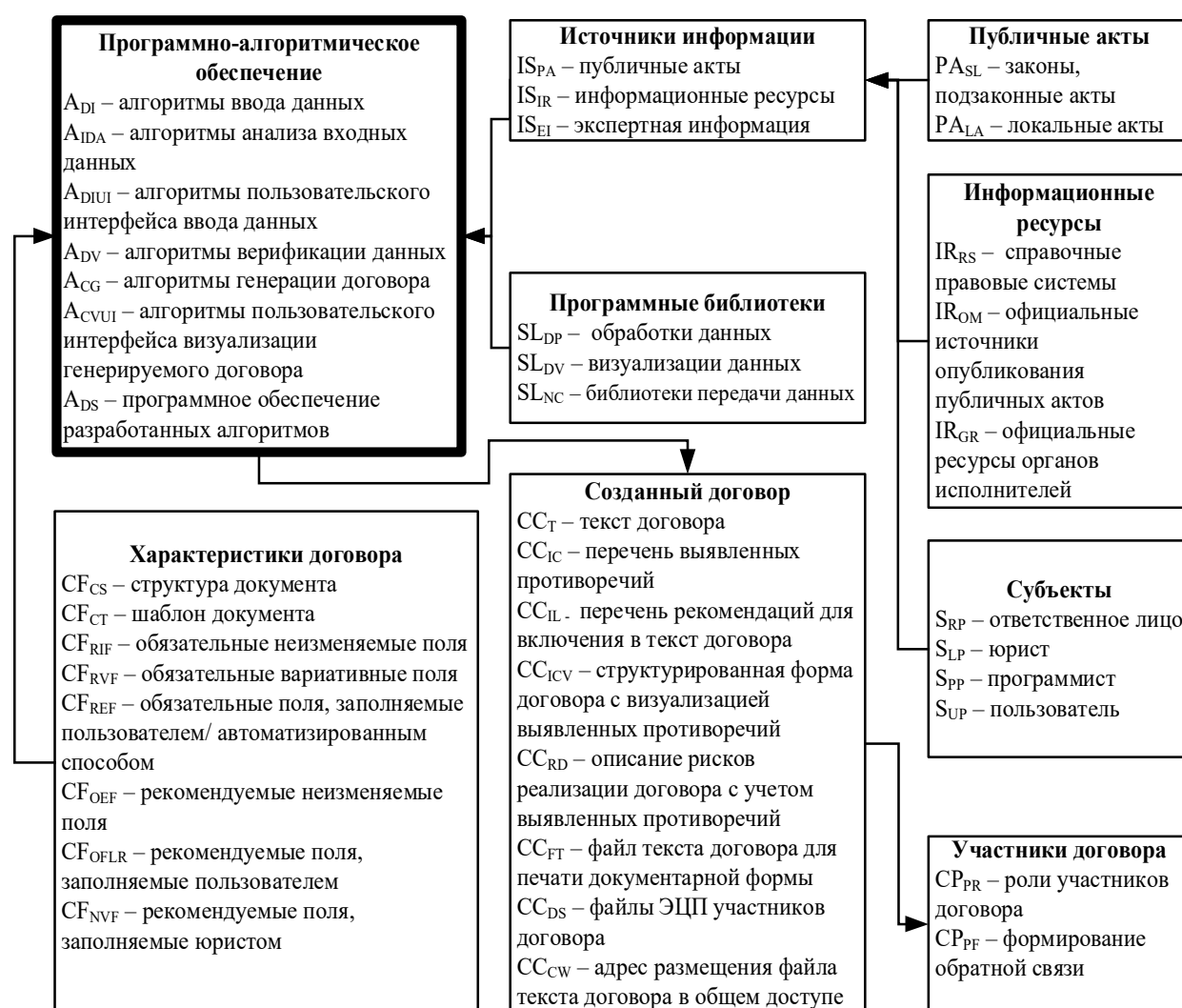


Рис. 2. Концептуальная модель автоматизированного формирования текста договора

Fig. 2. Conceptual model of automated generation of contract texts

Исходя из предложенной концептуальной модели, сформулируем научную задачу диссертационного исследования следующим образом. Необходимо выполнить разработку модельно-алгоритмического и программного обеспечения обработки текстовой информации, доступной из публичных актов, информационных ресурсов, предоставляемой субъектами предметных областей, необходимого для автоматизированного формирования, верификации и визуализации частных актов, способствующего повышению степени автоматизации, скорости подготовки юридических документов, соответствующих требованиям действующих публичных актов. Кроме того, данная система должна обладать свойством открытости и допускать возможность её дальнейшей модификации и дополнения функциональных свойств.

На основе предложенной концептуальной модели рассмотрим далее теоретико-множественную модель процесса автоматизированного формирования текста договора, описываемую следующим кортежем параметров:

$$CGP = \langle IS, S, CP, CF, SL, CC, A \rangle,$$

где IS – множество источников информации; S – множество субъектов, участвующих в создании системы автоматизированной генерации текстов договора; CP – множество участников создаваемого договора; CF – множество характеристик договора; SL – множество программных библиотек, привлекаемых для реализации программных средств автоматизации правовой деятельности;

A – программно-алгоритмическое обеспечение; CC – созданный договор, представленный рядом параметров. Далее рассмотрим введенные множества более подробно.

$IS = \{IS^1, IS^2, \dots, IS^j, \dots, IS^J\}$ – множество источников информации, где уникальный номер $j \in [1, J]$; J – количество источников информации, доступных для создания необходимого документа в выбранной предметной области. Для автоматизации процесса создания частных актов в основном необходим анализ трех типов источников информации: множества публичных актов IS_{PA} , множества информационных ресурсов IS_{IR} , экспертной информации IS_{EI} . Соответственно множество $IS = \{IS_{PA}, IS_{IR}, IS_{EI}\}$.

В множестве публичных актов можно выделить два типа подмножеств $PA = \{PA_{SL^1}, PA_{SL^2}, \dots, PA_{SL^k}, \dots, PA_{SL^K}, PA_{LA^1}, PA_{LA^2}, \dots, PA_{LA^l}, \dots, PA_{LA^L}\}$, где $k \in [1, K]$, K – количество законов и подзаконных актов PA_{SL} , касающихся рассматриваемой предметной области; $l \in [1, L]$, L – количество локальных актов PA_{LA} .

Множество информационных ресурсов содержит три основных типа подмножества: $IR = \{IR_{RS}, IR_{OM}, IR_{GR}\}$, где IR_{RS} – справочные правовые системы, IR_{OM} – официальные источники опубликования публичных актов, IR_{GR} – официальные ресурсы органов исполнителей.

Источниками экспертной информации IR_{EI} является множество субъектов

$S = \{S_{RP}, S_{LP}, S_{PP}, S_{UP}\}$, где S_{RP} – множество ответственных лиц, экспертов в предметной области; S_{LP} – множество юристов; S_{PP} – множество программистов; S_{UP} – множество пользователей.

Используемые для разработки программных средств автоматизации правовой деятельности внешние программные библиотеки обозначим кортежем $SL = \langle SL_{DP}, SL_{DV}, SL_{NC} \rangle$, где SL_{DP} – библиотеки обработки данных; SL_{DV} – библиотеки визуализации данных; SL_{NC} – библиотеки передачи данных.

Программно-алгоритмическое обеспечение представим кортежем следующих параметров: $A = \langle A_{DI}, A_{IDA}, A_{DIUI}, A_{DV}, A_{CG}, A_{CVUI}, A_{DS} \rangle$, где A_{DI} – алгоритмы ввода данных; A_{IDA} – алгоритмы анализа входных данных; A_{DIUI} – алгоритмы пользовательского интерфейса ввода данных; A_{DV} – алгоритмы верификации данных; A_{CG} – алгоритмы генерации договора; A_{CVUI} – алгоритмы пользовательского интерфейса визуализации генерируемого договора; A_{DS} – программное обеспечение разработанных алгоритмов.

Множество характеристик договора представим кортежем следующих параметров:

$$CF = \langle CF_{CS}, CF_{CT}, CT_{RIF}, CF_{CT}, CF_{RVF}, CF_{REF}, CF_{OEF}, CF_{OFLR}, CF_{NVF}, CF_{VF}, CF_{VFLA} \rangle,$$

где CF_{CS} – структура документа; CF_{CT} – шаблон документа; CF_{RIF} – обязательные неизменяемые поля; CF_{RVF} – обязательные вариативные поля; CF_{REF} – обязательные поля, заполняемые пользова-

телем/автоматизированным способом; CF_{OEF} – рекомендуемые неизменяемые поля; CF_{OFLR} – рекомендуемые поля, заполняемые пользователем; CF_{NVF} – рекомендуемые поля, заполняемые юристом.

Для описания свойств созданного договора используем кортеж следующих параметров: $CC = \langle CC_T, CC_{IC}, CC_{IL}, CC_{ICV}, CC_{RD}, CC_{RD}, CC_{FT}, CC_{DS}, CC_{CW} \rangle$, где CC_T – текст договора; CC_{IC} – перечень выявленных противоречий; CC_{IL} – перечень рекомендаций для включения в текст договора; CC_{ICV} – структурированная форма договора с визуализацией выявленных противоречий; CC_{RD} – описание рисков реализации договора с учетом выявленных противоречий; CC_{FT} – файл текста договора для печати документарной формы; CC_{DS} – файлы ЭЦП участников договора; CC_{CW} – адрес размещения файла текста договора в общем доступе.

Каждый элемент CP^i множества участников договора $CP = \{CP^1, CP^2, \dots, CP^i, \dots, CP^I\}$ характеризуется двумя параметрами $CP^i = \langle CP_{PR}^i, CP_{PF}^i \rangle$, где CP_{PR}^i – роль i участника договора; CP_{PF}^i – отзыв/рекомендация i участника договора.

На основе введенных обозначений теперь можно сформулировать, что задача автоматизированного создания договора посредством программно-алгоритмического обеспечения A состоит в применении ограничений, заданных характеристиками договора CF , на множестве информации из источников

$IS=\{IS_{PA}, IS_{IR}, IS_{EI}\}$, доступных в выбранной предметной области для формирования значений параметров создаваемого договора СС.

В рассматриваемых отношениях не учитывается фактор времени, так как предполагается, что временные затраты на автоматизированное создание текста договора являются несущественными. Далее при описании процесса актуализации созданного договора будем рассматривать динамическую модель его обновления на основе событийной сценарной модели анализа версий публичных актов и выявления значений изменяемых полей. Дискретные значения множества временных событий T , характерных для обрабатываемого договора, содержат:

$$T=\{t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_e, \dots, t_E\},$$

где $e \in [3, E]$; t_0 – время создание 0 версии договора $CC(t_0)$, проверенной программистом S_{PP} ; t_1 – время создания 1 версии договора $CC(t_1)$, проверенной ответственным лицом S_{RP} и юристом S_{LP} ; t_2 – время создания 2 версии договора $CC(t_2)$, проверенной пользователем S_{UP} ; t_e – время положительной проверки наличия обновлений в источниках информации, после которой было произведено обновление значимых полей в e версии договора $CC(t_e)$. Предложенные модели автоматизации создания и актуализации договора затем были реализованы в виде алгоритмических моделей и программных средств.

Укрупненная алгоритмическая модель обработки параметров договора приведена на рис. 3, в ней реализованы основные этапы жизненного цикла документа: создание, обновление, удаление договора. Вначале эксперт-юрист формирует базу знаний, определяя семантическое наполнение характеристик договора CF , выбирает источники информации, необходимые для получения значений для переменных характеристик. Затем в ходе совместной работы экспертов (юриста и программиста) реализуется техническая часть генерации договора, в результате которой формируется шаблон договоров, заполняются текущие значения полей и производится их проверка.

В случае обнаружения ошибки документ возвращается на предыдущий этап, предлагая исправленный вариант или запрашивая снова информацию, необходимую для заполнения полей, где была допущена ошибка. Если система не обнаружила ошибки, то сформированный документ считается готовым и публикуется на заданном интернет-ресурсе с уведомлением заинтересованных сторон.

Затем на основе событийной модели или на регулярной основе осуществляется проверка наличия обновлений в публичных актах, использованных при создании шаблона договора. Необходимость выполнения данного действия обуславливается динамичностью правопорядка, так как содержание публичных актов может быть изменено в любой момент неограниченное число раз.

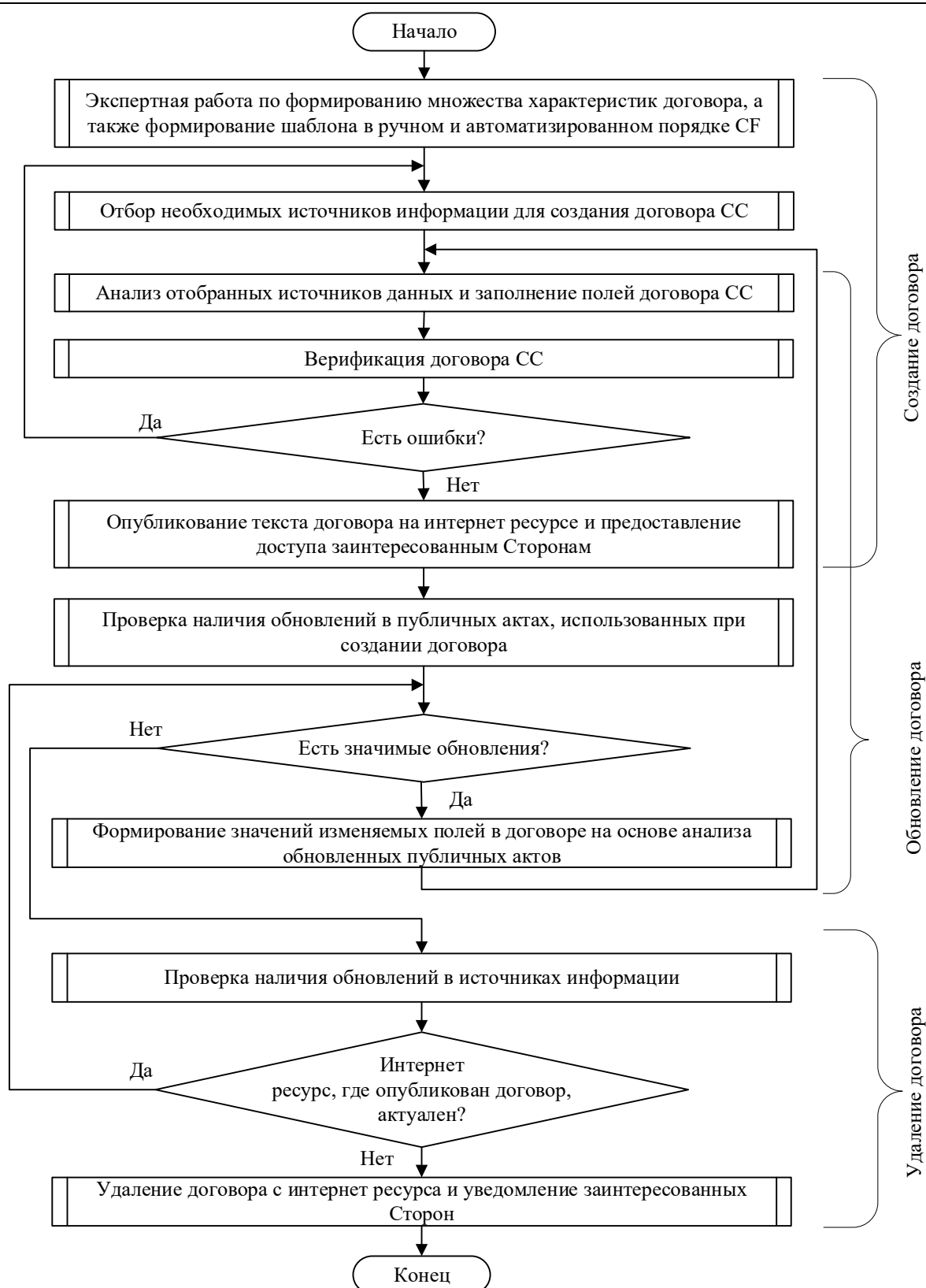


Рис. 3. Алгоритмическая модель автоматизированного создания и актуализации текста лицензионного договора

Fig. 3. Algorithmic model for automated creation and updating of license agreement texts

Для того чтобы не выполнять лишние действия, на этапе проектирования системы эксперт категоризирует изменения по критерию значимости, базируя свой ответ на классификации полей CF. В случае, если обновление определено как значимое, то происходит формирование значений изменяемых полей в договоре на основе анализа обновленных Публичных актов с возможностью запроса дополнительной информации у Пользователя и последующей проверкой договора. Если же значимых обновлений не обнаружено, то осуществляется проверка актуальности самого договора в источниках информации. Например, деятельность стороны прекращена в связи с ликвидацией, о чем делается запись в едином государственном реестре юридических лиц. В таком случае документ теряет свою актуальность и на этом его жизненный цикл завершается. При этом

заинтересованные стороны следует уведомить об удалении договора с Интернет-ресурса.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведен фрагмент структуризации правового документа с заполнением его полей, на примере лицензионного договора между автором статьи и издательством средства массовой информации – журнала «Информатика и автоматизация».

На примере лицензионного договора (публичной оферты для автора) журнала «Информатика и автоматизация» (<http://ia.spcras.ru/index.php/sp/author-guide>) было проанализировано количественное соотношение использованных характеристик CF. Полученные результаты представлены на рис. 4 в виде круговой диаграммы.

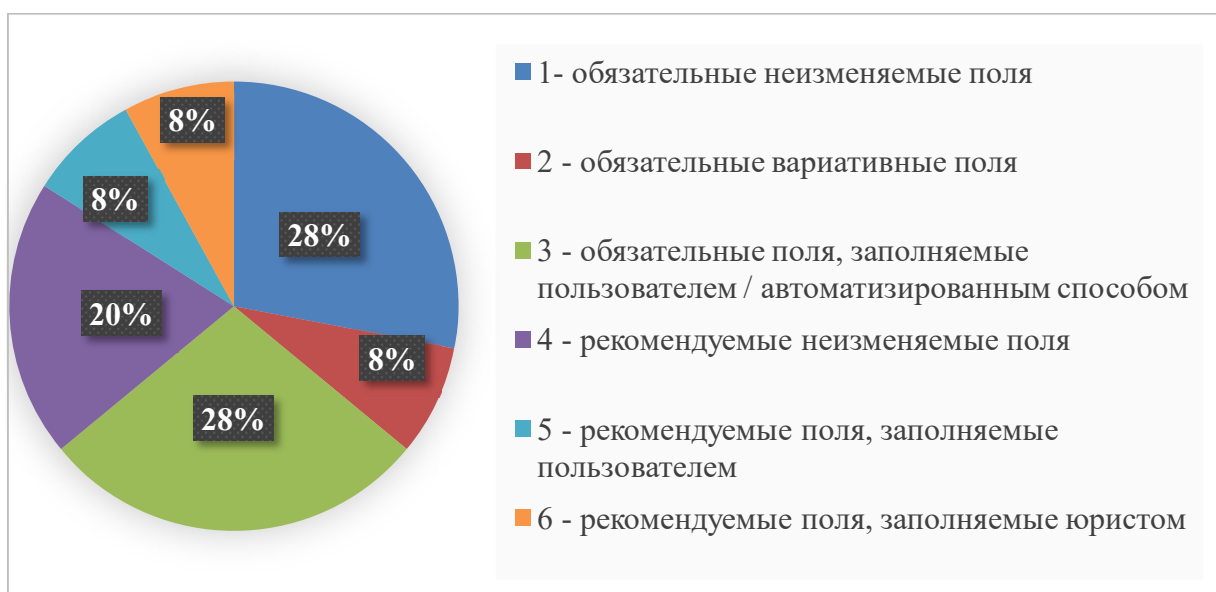


Рис. 4. Соотношение использованных типов характеристик CF договора

Fig. 4. Correlation between applied types of CF contract characteristics

Таблица 1. Фрагмент последовательного описания характеристик CF на примере лицензионного договора журнала «Информатика и автоматизация»**Table 1.** A fragment of a sequential description of CF characteristics for the case of a license agreement for Informatics and Automation journal

Тип характеристики CF / CF characteristic type	Описание ха- рактеристики / Characteristic description	Источник значения характеристики / Characteristic value source	Значение характери- стики / Characteristic value
CP _{RIF} ¹ – обязательное неизменяемое поле	-	-	журнал «
CP _{REF} ¹ – обязатель- ные поля, заполняе- мые пользователем	Наименование журнала	Устав журнала	информатика и автома- тизация
CP _{RIF} ² – обязательное неизменяемое поле	-	-	»
CP _{REF} ² – обязатель- ные поля, заполняе- мые пользователем	Наименование учредителя	Устав учредителя, единый государ- ственный реестр юридических лиц	Федеральное государ- ственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный исследо- вательский центр Рос- сийской академии наук» (СПБ ФИЦ РАН)
CP _{RIF} ³ – обязательное неизменяемое поле	-	-	публичная оферта
CP _{REF} ³ – обязатель- ные поля, заполняе- мые пользователем	Дата договора	Дата утверждения договора	01 марта 2022 г.
CP _{RIF} ⁴ – обязательное неизменяемое поле	-	-	вводные положения

В тексте договора было выделено 25 различных значений характеристик CF. Как демонстрируют данные, наиболее популярными типами характеристик были: обязательные неизменяемые поля и обязательные поля, заполняемые пользователем / автоматизированным

способом, каждая из которых составила по 28% от общего числа. Следующим по популярности использования типом характеристики выступили рекомендуемые неизменяемые поля – 20 % от общего числа. Оставшиеся типы характеристик, которые относятся к рекоменду-

емым полям, были использованы в равном объеме – по 8 % от общего числа.

В ходе разметки шаблона договора было установлено, что некоторые характеристики могут являться взаимозаменяемыми. Например, рекомендуемые неизменяемые поля; рекомендуемые поля, заполняемые пользователем. Выбор соответствующего типа поля зависит от того, насколько разработчики системы генерации договора допускают свободу действий со стороны конечного пользователя системы, в данном случае сотрудника редакции журнала, отвечающего за правовые аспекты издательства. Разрабатываемые в рамках данного исследования программные сервисы СПб ФИЦ РАН по автоматизации правовой деятельности размещены на <http://legaltech.viwo.ru/>.

Выводы

В результате анализа направлений автоматизации юридической деятельности и технологий, применимых для этой задачи, функциональных особенностей существующих решений, а также принципов построения системы автоматизированного формирования текста договоров можно прийти к следующим выводам. Во-первых, данная система должна быть построена на принципе открытости и быть стохастичной, что позволит модифицировать её таким об-

разом, чтобы постепенно увеличивать функционал, добавляя новые возможности и не устанавливать необоснованные лимиты развития. Во-вторых, модель системы должна обладать свойством динамичности [23], так как содержание публичных актов не зафиксировано раз и навсегда, а время от времени претерпевает изменения. В-третьих, открытость системы также должна проявляться в возможности её интеграции с существующими решениями и информационными ресурсами, которые позволяют в упрощенном порядке формировать базу знаний. В-четвертых, для построения сложного решения, которое бы учитывало разнообразие фактических отношений, необходимо предусмотреть полномочия эксперта, которые бы позволяли ему проверять и дополнять получаемые на выходе результаты, что по итогу относит такую систему автоматизации договорной деятельности к управляемой извне в рамках классификации систем по способам управления [23]. Качественная характеристика данного свойства зависит от свободы усмотрения конечного пользователя, которую проектируют создатели системы, и выражается в количественном соотношении типов характеристик договора, которое не является абсолютно детерминированным.

Список литературы

1. Mania Karolina. (2022). Legal Technology: Assessment of the Legal Tech Industry's Potential. *Journal of the Knowledge Economy*. 10.1007/s13132-022-00924-z.

2. Salmerón-Manzano Esther. 2021. Legaltech and Lawtech: Global Perspectives, Challenges, and Opportunities. *Laws* 10: 24. <https://doi.org/10.3390/laws10020024>
3. Markou Christopher and Deakin, Simon F., Is Law Computable? From Rule of Law to Legal Singularity (April 30, 2020). University of Cambridge Faculty of Law Research Paper, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3589184> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3589184>
4. Ludvig Beckman, Popular sovereignty facing the deep state. The rule of recognition and the powers of the people, *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 10.1080/13698230.2019.1644583, (1-23), (2019).
5. Boukema H. J. M. "Legal Realism and Legal Certainty." *ARSP: Archiv Für Rechts-Und Sozialphilosophie / Archives for Philosophy of Law and Social Philosophy* 66, no. 4 (1980): 469–85. <http://www.jstor.org/stable/23679543>.
6. Lee Loevinger, Jurimetrics: The Methodology of Legal Inquiry, 28 *Law and Contemporary Problems* 5-35 (Winter 1963) Available at: <https://scholarship.law.duke.edu/lcp/vol28/iss1/2>
7. Kerimov D. A. "FUTURE APPLICABILITY OF CYBERNETICS TO JURISPRUDENCE IN THE U.S.S.R." *MULL: Modern Uses of Logic in Law* 4, no. 4 (1963): 153–62. <http://www.jstor.org/stable/29760952>.
8. Rigutini Leonardo. *AUTOMATIC TEXT PROCESSING: MACHINE LEARNING TECHNIQUES*. 2005
9. Wiesmann Eva. Machine Translation in the Field of Law: A Study of the Translation of Italian Legal Texts into German // *Comparative Legilinguistics*. 2019, 37, 117-153. 10.14746/cl.2019.37.4.
10. Moruf Hawwau & Adeleke, Lateef. Electronic information resources and the legal profession: the case of Oyo State High Courts, Nigeria // *Journal of Information & Knowledge Management*. 2018. 9. 26. 10.4314/ijikm.v9i1.3.
11. Justiss Laura K., A Survey of Electronic Research Alternatives to Lexis and Westlaw in Law Firms (). *Law Library Journal*, Vol. 103, No. 1, p. 71, 2011, SMU Dedman School of Law Legal Studies Research Paper no. 62, July 21, 2010. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1649471>
12. Buscema Massimo & Tastle, William. Intelligent Data Mining in Law Enforcement Analytics. 2013. 10.1007/978-94-007-4914-6.
13. Braun Willard. Statistics in the law, by Joseph B. Kadane. *Law, Probability and Risk*. 2009. 8. 353-359. 10.1093/lpr/mgp022.
14. McLachlan Scott, Webley Lisa. Visualisation of Law and Legal Process: An Opportunity Missed. 2020.
15. Hildebrandt, Mireille. The Meaning and the Mining of Legal Texts. Mireille Hildebrandt. 2010.

16. Распознавание символьной информации для автоматизации производственных процессов / В.С. Панищев, М.И. Труфанов, О.Г. Добросердов, О.О. Хомяков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. 25(1): 122-137. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-122-137>
17. Пименов В.И., Воронов М.В. Формализация регулятивных текстов // Информатика и автоматизация. 2021. 3(20):562-590. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.3.3>.
18. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, С. В. Горбачев, Ц. Цао, С. Бхаттачарья // Информатика и автоматизация, 2022, 21(2), 376-404. <https://doi.org/10.15622/ia.21.2.6>
19. Mattheyses Wesley, Verhelst Werner. Audiovisual speech synthesis: An overview of the state-of-the-art. *Speech Communication*. 2014. 66. 10.1016/j.specom.2014.11.001.
20. Brunschwig Colette. Multisensory law and legal informatics – a comparison of how these legal disciplines relate to visual law. 2011.
21. Callister Paul. Law, Artificial Intelligence, and Natural Language Processing: A Funny Thing Happened on the Way to My Search Results // *Law library journal*. 2020. 112. 161.
22. Timmer Ivar. Contract Automation: Experiences from Dutch Legal Practice. 2019. 10.1007/978-981-13-6086-2_6.
23. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989. 360 с.

References

1. Mania Karolina. Legal Technology: Assessment of the Legal Tech Industry's Potential. *Journal of the Knowledge Economy*. 2022. 10.1007/s13132-022-00924-z.
2. Salmerón-Manzano, Esther. Legaltech and Lawtech: Global Perspectives, Challenges, and Opportunities. 2021. *Laws* 10: 24. <https://doi.org/10.3390/laws10020024>
3. Markou Christopher, Deakin Simon F., Is Law Computable? From Rule of Law to Legal Singularity (April 30, 2020). University of Cambridge Faculty of Law Research Paper, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3589184> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3589184>
4. Ludvig Beckman, Popular sovereignty facing the deep state. The rule of recognition and the powers of the people, *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 10.1080/13698230.2019.1644583, 1-23, 2019.
5. Boukema H. J. M. Legal Realism and Legal Certainty.” *ARSP: Archiv Für Rechts-Und Sozialphilosophie*. *Archives for Philosophy of Law and Social Philosophy* 66, no. 4 (1980): 469–85. <http://www.jstor.org/stable/23679543>.
6. Lee Loevinger, Jurimetrics: The Methodology of Legal Inquiry, 28 *Law and Contemporary Problems* 5-35 (Winter 1963) Available at: <https://scholarship.law.duke.edu/lcp/vol28/iss1/2>

7. Kerimov D. A. "Future Applicability of Cybernetics to Jurisprudence in the U.S.S.R." Mull: Modern Uses of Logic in Law 4, no. 4 (1963): 153–62. <http://www.jstor.org/stable/29760952>.
8. Rigutini Leonardo. (2005). Automatic text processing: machine learning techniques.
9. Wiesmann Eva. Machine Translation in the Field of Law: A Study of the Translation of Italian Legal Texts into German. *Comparative Legilinguistics*, 2019, 37, pp. 117-153. 10.14746/cl.2019.37.4.
10. Moruf Hawwau, Adeleke Lateef. Electronic information resources and the legal profession: the case of Oyo State High Courts, Nigeria. *Journal of Information & Knowledge Management*. 2018. 9. 26. 10.4314/ijikm.v9i1.3.
11. Justiss Laura K., A Survey of Electronic Research Alternatives to Lexis and Westlaw in Law Firms (July 21, 2010). Law Library Journal, vol. 103, no. 1, p. 71, 2011, SMU Dedman School of Law Legal Studies Research Paper No. 62 , Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1649471>
12. Buscema Massimo, Tastle William. (2013). Intelligent Data Mining in Law Enforcement Analytics. 10.1007/978-94-007-4914-6.
13. Braun Willard. Statistics in the law, by Joseph B. Kadane. *Law, Probability and Risk*. 2009. 8. 353-359. 10.1093/lpr/mgp022.
14. McLachlan Scott, Webley Lisa. Visualisation of Law and Legal Process: An Opportunity Missed. 2020
15. Hildebrandt Mireille. The Meaning and the Mining of Legal Texts. Mireille Hildebrandt. 2010
16. Panishchev V.S., Trufanov M.I., Dobroserdov O.G., Khomyakov O.O. Recognition of character information for automation of production processes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2021;25(1): 122-137. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-122-137>
17. Pimenov V., Voronov M. Formalizatsiya regulativnykh tekstov. [Formalization of Regulatory Texts]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, 20(3): 562-590. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.3.3>.
18. Bobyr M., Arkhipov A., Gorbachev S., Cao J., Bhattacharyya S. Nechetkologicheskie metody v zadache detektirovaniya granits ob"ektov [Fuzzy Logic Approaches in the Task of Object Edge Detection]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2022, 21(2): 376-404. <https://doi.org/10.15622/ia.21.2.6>
19. Mattheyses Wesley, Verhelst, Werner. Audiovisual speech synthesis: An overview of the state-of-the-art. *Speech Communication*. 2014. 66. 10.1016/j.specom.2014.11.001.
20. Brunschwig Colette. Multisensory law and legal informatics – a comparison of how these legal disciplines relate to visual law. 2011.

21. Callister Paul. Law, Artificial Intelligence, and Natural Language Processing: A Funny Thing Happened on the Way to My Search Results. *Law library journal*. 2020. 112. 161.
22. Timmer Ivar. Contract Automation: Experiences from Dutch Legal Practice. 2019. 10.1007/978-981-13-6086-2_6.
23. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Vvedenie v sistemnyi analiz* [Vvedenie v sistemnyj analiz]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. P.360.

Информация об авторах / Information about the Authors

Котов Александр Александрович, аспирант, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: alexanderkotovspb@gmail.com

Alexander A. Kotov, Post-Graduate Student, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: alexanderkotovspb@gmail.com

Ронжин Андрей Леонидович, профессор РАН, доктор технических наук, профессор, директор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Andrey L. Ronzhin, Professor of RAS, Dr. of Sci. (Engineering), Technical Sciences, Professor, Director, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Математическое моделирование траекторного управления движением подводного бионического робота-разведчика типа «каракатица»

Б.В. Лушников¹ ✉, В.В. Трофимов¹

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

✉ e-mail: bvl_61@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка и реализация алгоритма траекторного управления автономного необитаемого подводного аппарата бионического типа каракатица, предназначенного для проведения разведывательных операций, боевого охранения надводных и подводных средств военно-морского флота.

Методы. Представлена конструкция и принцип действия бионического подводного робота типа каракатица. Проектирование трехмерной модели робота-каракатицы для военной разведки проводилось посредством использования программного пакета SolidWorks. Рассмотрена расчетная динамическая схема и представлена математическая модель движения подводного плавающего робота, реализованная в пакете Mathcad. Движение робота обеспечивается волнообразными перемещениями эластичных боковых плавников, упирающимися на водную среду и формирующими тяговые усилия в требуемом направлении. Методами компьютерного математического моделирования доказана адекватность разработанной математической модели подводного робота и отработан алгоритм траекторного управления движением объекта по заданной траектории с требуемой скоростью.

Результаты. Система автоматического управления траекторным движением рассмотрена на примере движения робота в горизонтальной плоскости с выходом на заданную прямолинейную траекторию и поддержания требуемого режима продольного движения с заданной скоростью. Для этого были сформированы каналы управления силами тяги, создаваемыми волнообразными движениями боковых плавников, по угловой и ортогональной ошибкам. Подобраны коэффициенты регуляторов, обеспечивающие асимптотическую устойчивость системы и требуемое качество переходных процессов.

Заключение. Разработанный и реализованный алгоритм траекторного управления движением подводного бионического робота типа каракатица из различных начальных положений по заданной траектории показал хорошую адекватность и высокую эффективность, демонстрируя устойчивость и обеспечивая требуемые показатели качества переходных процессов.

Ключевые слова: бионический подводный робот; траекторное управление движением; математическое моделирование; система автоматического управления

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

Для цитирования: Лушников Б.В., Трофимов В.В. Математическое моделирование траекторного управления движением подводного бионического робота-разведчика типа «каракатица» // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 106-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-106-121>.

Поступила в редакцию 08.04.2022

Подписана в печать 02.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Mathematical Modelling of the Trajectory Control of the movement of a Cuttlefish-Type Undersea Bionic Reconnaissance Robot

Boris V. Lushnikov ¹ ✉, Vladimir V. Trofimov ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: bvl_61@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. is to develop and implement an algorithm for trajectory control of an autonomous unmanned undersea cuttlefish-type bionic vehicle, designed for reconnaissance operations, combat security of surface and undersea naval armament.

Methods. The design and principle of operation of a cuttlefish-type bionic undersea robot are presented. The design of a three-dimensional model of a cuttlefish-type robot for military intelligence has been carried out using the SolidWorks software package. A computational dynamic scheme has been considered and a mathematical model of the movement of an undersea amphibious robot implemented in the Mathcad package has been presented. The movement of the robot is provided by wave-like movements of the elastic side fins resting against the aquatic environment and forming tractive forces in the required direction. Using the methods of computer mathematical modelling, the adequacy of the developed mathematical model of the undersea robot has been proved and the algorithm for trajectory control of the movement of the object along a given trajectory at a required speed has been worked out.

Results. The system of automatic control of the trajectory movement has been considered for the case of the movement of the robot in a horizontal plane with further passage to a given linear trajectory and maintaining the required mode of longitudinal movement at a given speed. To do this, channels to control tractive forces created by the wave-like movements of the lateral fins have been formed according to the angular and orthogonal errors. The coefficients of the controllers have been selected to ensure the asymptotic stability of the system and the required quality of transient processes.

Conclusion. The developed and implemented algorithm for trajectory control of the movement of an undersea cuttlefish-type bionic robot from various initial positions along a given trajectory showed good adequacy and high effectiveness demonstrating stability and providing the required indicators of the quality of transient processes.

Keywords: bionic undersea robot; trajectory movement control; math modelling; automatic control 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: Lushnikov B. V., Trofimov V. V. Mathematical Modelling of the Trajectory Control of the movement of a Cuttlefish-Type Undersea Bionic Reconnaissance Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 106-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-106-121>.

Received 08.04.2022

Accepted 02.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Развитие автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) становится всё более перспективным. АНПА показали свою эффективность при выполнении различного рода работ в Мировом океане от обзорно-поисковых до разведывательных, открыли ряд новых важных применений. К настоящему времени насчитывается около 700-800

различных проектов АНПА, при этом число всех созданных аппаратов уже превысило 5000 [1]. Мировыми лидерами в разработке и производстве АНПА являются США, Великобритания, Канада, Франция, Германия и Япония, причем подводные роботы военного или двойного назначения составляют внушительные сегменты рынка (рис. 1) [2].

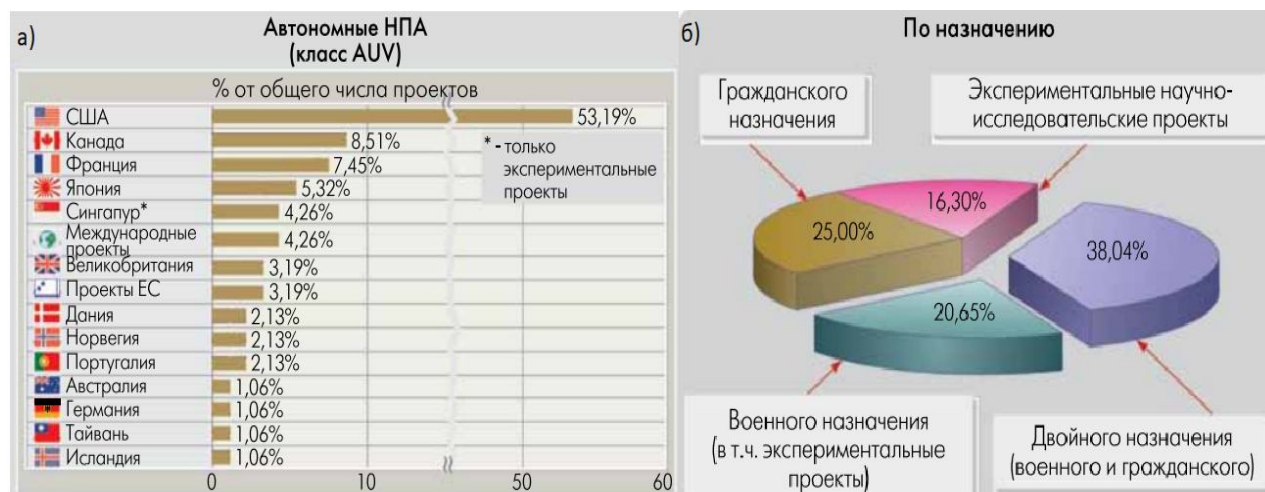


Рис. 1. Характеристика активности зарубежных стран в разработках АНПА по числу проектов (а) и по назначению (б) [1,2]

Fig. 1. Characteristics of foreign countries activities in the development of unmanned undersea vehicle by the number of projects (a) and by purpose (b)

Создание отечественного аналога малогабаритного подводного робота как автоматизированного средства мониторинга, разведки и боевого охранения при выполнении боевых операций Военно-морского флота Российской Федерации в различных условиях и местах Мирового океана повысило бы конкурентоспособность России в мировой гонке вооружений в сфере робототехники. Это приве-

дет к повышению качества разведывательных операций, снижению количества потерь живой силы и является актуальной задачей для обеспечения обороноспособности РФ.

Главным требованием к средствам разведки в настоящий момент является скрытность выполнения разведывательных операций, боевого охранения надводных и подводных средств военно-

морского флота с помощью мобильных подводных аппаратов при минимизации воздействия их на окружающую среду и умении быстро реагировать на изменение окружающих условий [3].

Разработка и реализация максимально энергоэффективного типа движения занимает умы инженеров на протяжении последних десятилетий [4, 5]. Классические технические решения для обеспечения движения, придуманные человечеством (колеса, гусеницы, воздушные винты и т.д.), не всегда являются конкурентно способными с точки зрения расхода энергии на проходимый километр по сравнению с бионическими принципами движения, рожденными самой природой в ходе эволюции [6]. Поэтому использование типов движения, которыми пользуются животные – самые энергоэффективные «механизмы» на планете, является весьма перспективной задачей, решением которой занимается новое, активно развивающееся направление науки и техники – бионика. Имитация или копирование принципов поведения живых организмов позволяет создавать устройства, которые обладают уникальными свойствами, обеспечивающими повышение эффективности и скрытности перемещения под водой и выполнения разведывательных операций [7-13].

Одним из наиболее интересных механизмов движения обладают каракатицы. При помощи плавных волнообразных движений своих плавников они могут преодолевать большие расстояния

под водой, при этом растрачивая небольшие запасы своей энергии, добыча которой на глубинах затруднена [14].

Технически принцип работы волнового движителя в предлагаемой механической конструкции робота-каракатицы заключается в том, что коленчатый вал, который приводится во вращение электродвигателем, создаёт колебательное движение выходных звеньев (спиц), на которых установлены эластичные плавники. Получаемые волнообразные движения плавников, которые опираются на окружающую водную среду, создают силу тяги в заданном направлении. Данных о наличии в Российской Федерации аналогов такого вида движителя и конструкции аппарата по предлагаемым техническим решениям не имеется.

Материалы и методы

Конструкция и принцип действия АНПА типа «каракатица»

Проектирование трёхмерной модели робота-каракатицы для военной разведки проводилось посредством использования программного пакета SolidWorks. В процессе проектирования были учтены такие параметры, как форма и размеры корпуса робота, подходящие материалы, максимально допустимая масса устройства, обеспечение герметичности на требуемой глубине и т.д.

На рис. 2 представлен внешний вид трёхмерной модели робота-каракатицы, реализованной в среде SolidWorks.

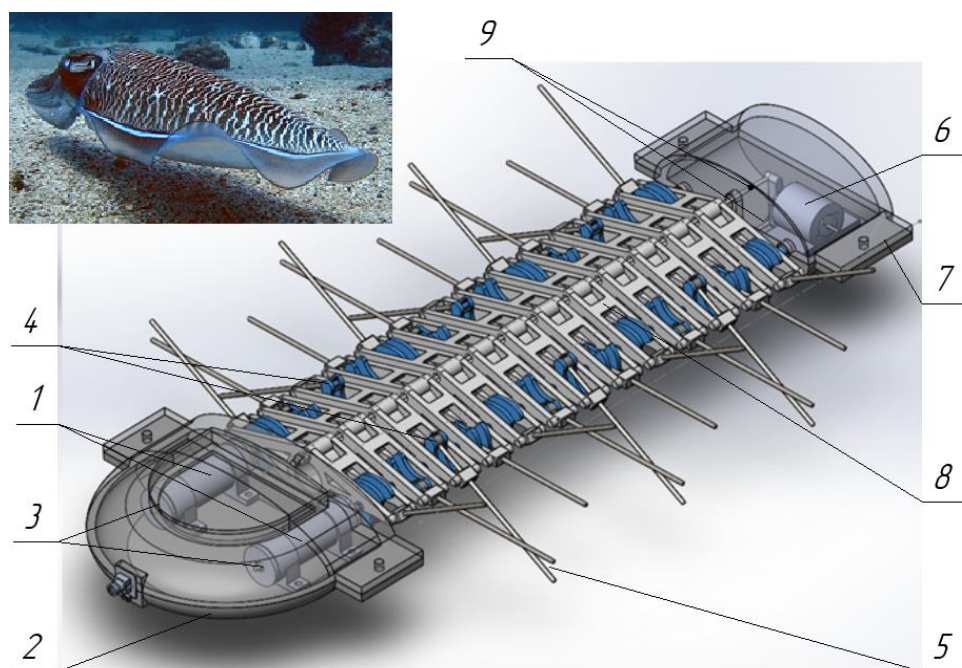


Рис. 2. Трёхмерная модель робота-каракатицы

Fig. 2. 3-D model of a cuttlefish-type robot

Робот-каракатица приводится в движение двумя приводами (1), отвечающими за вращение коленчатых валов и состоящими из коллекторных ДПТ и планетарных редукторов компании Махон, расположенных в головной части робота (2). На измерительном валу каждого двигателя установлен магнитный инкрементальный энкодер (3), который считает обороты и передает эти данные на микроконтроллер. Информация об угловой скорости используется для формирования управляющего воздействия (величины ШИМ – сигнала) для драйвера ДПТ, который непосредственно регулирует обороты и режимы работы двигателей.

Во время поворота или обхода препятствия в горизонтальной плоскости

информация с датчиков позволяет находящемуся на управляющей плате микроконтроллеру определять необходимые угловые скорости коленчатых валов (4), приводящие в движение спицы (5), которые, в свою очередь, обеспечивают волнообразное движение гибких боковых пластин (плавников) (на рисунке не показаны).

Для возможности динамического погружения или всплытия робота используется привод (6), расположенный в хвостовой части робота (7), который обеспечивает изгиб позвоночника (8) за счёт осуществления натяжения упругих струн (9), проходящих вдоль тела робота и закрепленных в задней части головы робота.

Вся информационно-управляющая система построена на базе платы Arduino MEGA, микроконтроллера, которой формирует все управляющие сигналы, обрабатывает информацию с приводов и датчиков окружающей среды (УЗ – дальномеры, датчики угла поворота, давления, система навигации и приёма команд и камера) [15-16]. Работа с энкодерами и УЗ – дальномерами реализована через внешние прерыва-

ния, остальные датчики, как и программа движения робота, обрабатываются в основном программном цикле.

Расчетная динамическая схема и математическая модель движения устройства

Для получения и исследования математической модели рассматриваемого устройства была использована расчетная динамическая схема, представленная на рис. 3.

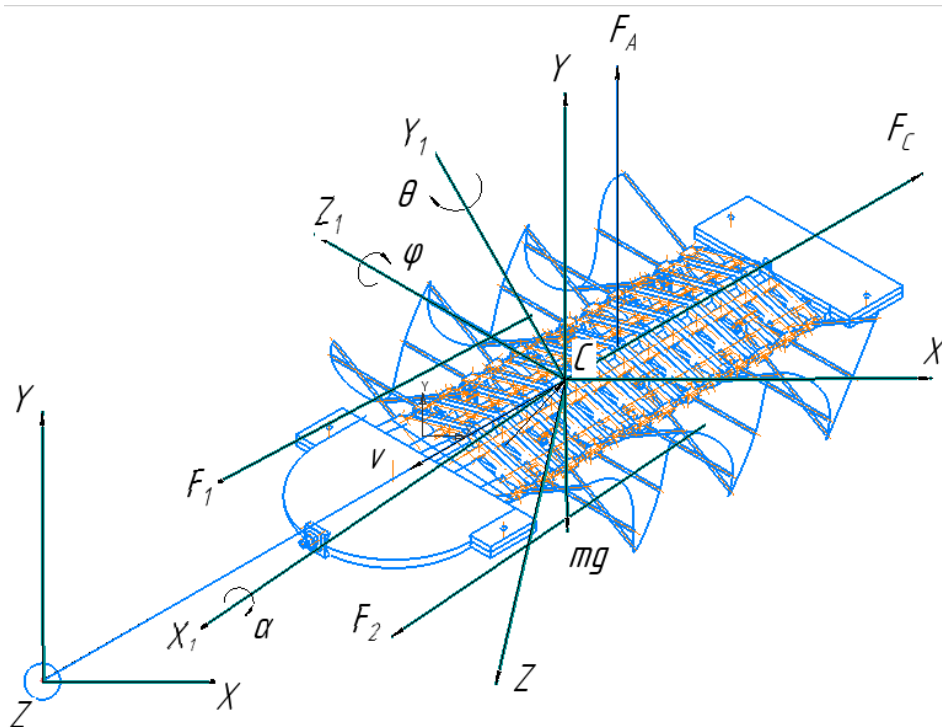


Рис. 3. Расчётная динамическая схема робота

Fig.3. Dynamic design diagram of the robot

Положение робота в пространстве будет определяться координатами центра масс «тела» робота (X ; Y ; Z), и углами Эйлера α (угол крена), θ (угол курса) и φ (угол тангажа) поворота вокруг осей X , Y и Z соответственно. Также введена система относительных ко-

ординат, связанных с центром тяжести (X_1 ; Y_1 ; Z_1). Установившееся значение угла крена (φ) вокруг оси X будем принимать равным нулю вследствие обеспечения безусловной устойчивости робота, в результате действия момента, создаваемого силой тяжести и силой

Архимеда, приложенной в центре объёма (рис.3) [17-18].

Движение робота происходит благодаря сил тяги, возникающих при волнообразном движении боковых плавников за счёт вращения коленчатых валов с угловыми скоростями ω_i

$$F_i(\omega_i) = \beta \omega_i^2 \text{sign}(\omega_i), i=1,2; \quad (1)$$

где β – коэффициент, учитывающий геометрические особенности плавников и плотность среды.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение рассматриваемого устройства, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{1x}(\omega_1) + F_{2x}(\omega_2) + F_{\text{сопр}}^x(\dot{x}) \\ m\ddot{y} = F_{1y}(\omega_1) + F_{2y}(\omega_2) + F_{\text{сопр}}^y(\dot{y}) - mg + F_A \\ m\ddot{z} = F_{1z}(\omega_1) + F_{2z}(\omega_2) - F_{\text{сопр}}^z(\dot{z}) \\ J_x \ddot{\alpha} = M(mg) + M(F_A) + M_{\text{сопр}}(\dot{\alpha}) = 0 \\ J_y \ddot{\theta} = M(F_1, F_2) + M_{\text{сопр}}(\dot{\theta}) \\ J_z \ddot{\phi} = M(mg) + M(F_A) + M_{\text{сопр}}(\dot{\phi}), \end{cases} \quad (2)$$

где m, J_x, J_y, J_z – масса робота и его моменты инерции относительно осей x, y и z ; $(x, y, z, \alpha, \theta, \phi)^T$ – вектор обобщенных координат; $F_{1x}, F_{1y}, F_{1z}, F_{2x}, F_{2y}, F_{2z}$ – проекции сил тяги, создаваемых, соответственно, правым и левым плавниками, на оси координат x, y, z ; ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения правого и левого коленчатых валов приводов плавников; F_A – архимедова сила; $F_{\text{сопр}}^x(\dot{x}), F_{\text{сопр}}^y(\dot{y}), F_{\text{сопр}}^z(\dot{z})$ – проекции вязкого сил сопротивления движению робота в водной среде на оси x, y, z ; $M(F_1, F_2) = (F_1 - F_2)l$ – момент от сил тяги плавников, обеспечивающий повороты робота в горизонтальной плоскости (вокруг оси y),

остальные моменты вызваны действием соответствующих указанных сил.

Так как движение в горизонтальной и вертикальной плоскости происходит независимо друг от друга, рассмотрим движение робота на плоскости, исключив из анализа погружение и всплытие робота (рис.4).

Положение корпуса робота (см. рис.4) как твёрдого тела на плоскости характеризуется координатами $(x; y)$ и α , где $(x; y)$ – вектор декартовых координат центра масс C , α – угловая ориентация продольной оси робота с осью x .

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение робота на плоскости, имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \sum F_{x_i} = \left(\frac{F_1 + F_2}{2}\right) \cos \alpha + F_{\text{сопр}}^x \\ m\ddot{y} = \sum F_{y_i} = \left(\frac{F_1 + F_2}{2}\right) \sin \alpha + F_{\text{сопр}}^y \\ J \ddot{\alpha} = (F_1 - F_2)l + \mu \dot{\alpha} | \dot{\alpha} |, \end{cases} \quad (3)$$

где μ – коэффициент вязкого сопротивления вращению корпуса робота относительно вертикальной оси; l – расстояние между левым и правым плавниками.

Силы сопротивления при движении робота в водной среде определяются выражениями:

$$\begin{aligned} F_{\text{сопр}}^{x1} &= -k_1 \cdot u_{x1} \cdot |u_{x1}| \\ F_{\text{сопр}}^{y1} &= -k_2 \cdot u_{y1} \cdot |u_{y1}|, \end{aligned}$$

где $F_{\text{сопр}}^{x1}, F_{\text{сопр}}^{y1}$ – проекции силы сопротивления на локальные оси координат x_1 (продольную) и y_1 (поперечную) соответственно; k_1, k_2 – коэффициенты сопротивления среды; u_{x1}, u_{y1} – проекции линейной скорости движения центра масс робота на оси координат x_1 и y_1

соответственно, которые определяются по формулам:

$$u_{x1} = \dot{x} \cdot \cos \alpha + \dot{y} \cdot \sin \alpha,$$

$$u_{y1} = -\dot{x} \cdot \sin \alpha + \dot{y} \cdot \cos \alpha).$$

$$\begin{cases} F_{\text{сопр}}^{x1} = -k_1 (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha) \cdot |\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha| \\ F_{\text{сопр}}^{y1} = -k_2 (-\dot{x} \sin \alpha + \dot{y} \cos \alpha) \cdot |-\dot{x} \sin \alpha + \dot{y} \cos \alpha|, \end{cases} \quad (4)$$

а система дифференциальных уравнений (3) примет вид

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} \left[\left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \cdot \cos \alpha + F_{\text{сопр}}^{x1} \cdot \cos \alpha + F_{\text{сопр}}^{y1} \cdot \sin \alpha \right] \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} \left[\left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \cdot \sin \alpha + F_{\text{сопр}}^{x1} \cdot \sin \alpha + F_{\text{сопр}}^{y1} \cdot \cos \alpha \right] \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{J} (l \cdot (F_1 - F_2) - \mu_c \cdot \dot{\alpha} \cdot |\dot{\alpha}|) \end{cases} \quad (5)$$

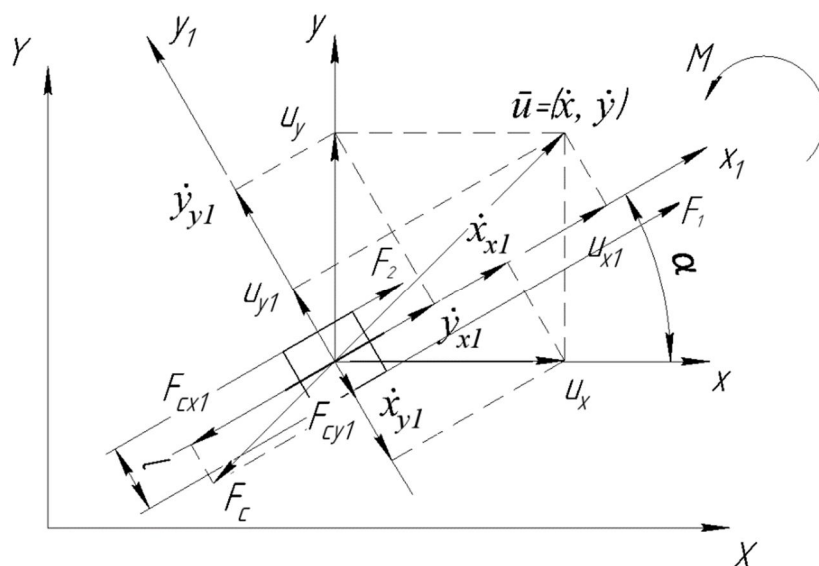


Рис. 4. Расчетная динамическая схема движения робота-каракатицы в горизонтальной плоскости

Fig. 4. Dynamic design diagram of the cuttlefish-type robot movement in the horizontal plane

Полученная система (5) с учётом (4) определяет движение робота в горизонтальной плоскости под действием движущих сил тяги F_1 и F_2 , возникающих от волнообразного движения плавников.

Моделирование управления траекторным движением робота

Для обеспечения движения подводного робота по заранее спланированной

траектории будем использовать хорошо зарекомендовавший себя известный подход по траекторному управлению плоским движением автономных роботов по предписанной траектории с определенной скоростью [19]. При рассматриваемом подходе сложная многоканальная задача управления сводится к ряду простых задач компенсации линейных и угловых отклонений и ис-

пользовании стандартных приёмов нелинейной стабилизации [20] для получения адекватных законов управления.

Рассмотрим алгоритм процесса управления на примере движения робота из заданной начальной точки и с нулевой начальной скоростью на прямолинейную траекторию вида (рис. 5):

$$Ay+Bx+C=0 \quad (6)$$

и дальнейшего его движения с заданной, например, постоянной скоростью $v^* = \text{const}$. Для управления траекторным движением автономного робота введём понятия ошибок траекторного движения. Ошибку положения будем определять ортогональным отклонением

$e = e(x, y)$ как кратчайшим расстоянием от текущего положения робота до желаемой траектории движения (6). Угловая ошибка ориентации корпуса робота будет определяться разностью угла текущего положения робота и угла наклона прямой α^* к мировой системе координат $\delta = \alpha - \alpha^*$, где $\alpha^* = \arctg \frac{B}{A}$.

Тогда ошибка положения робота относительно прямой (6) (рис.5), заданной в неявном виде, как кратчайшее расстояние d от текущего положения робота с координатами (x, y) до этой прямой, будет определять выражением

$$d = e(x, y) = \frac{A \cdot y + B \cdot x + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

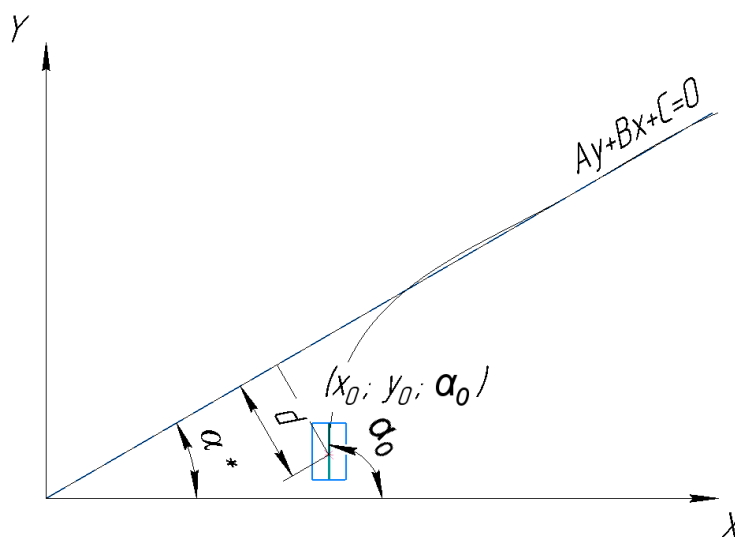


Рис. 5. Схема выхода робота на прямолинейную траектории из начального положения

Fig. 5. The diagram of robot passage to linear trajectory from initial position

Пусть, например, задана требуемая траектория движения $y=x$, для которой коэффициенты $A=1$, $B=-1$, $C=0$.

Тогда ошибка по положению равна

$$d=e(x,y)=\frac{y-x}{\sqrt{2}}=\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot y - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot x,$$

а угловая ошибка $\delta = \alpha - \pi/4$. Выражения их производных по времени как скорости изменения ошибок будут, соответственно, иметь вид

$$\frac{de}{dt} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{y} - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{x}, \quad \frac{d\delta}{dt} = \dot{\alpha}.$$

Таким образом, задача траекторного управления автономным роботом будет заключаться в определении сил тяги боковых плавников F_1 и F_2 , формируемых в соответствии с выражениями (1), которые обеспечивают:

(а) максимально быстрый выход робота на требуемую прямолинейную траекторию $A \cdot y + B \cdot x + C = 0$, что подразумевает обнуление вектора ортогонального отклонения d ;

(б) поддержание требуемого режима продольного движения объекта по желаемой прямолинейной траектории с обнулением скоростной ошибки:

$\Delta\theta = v^* \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$, где $v^* = \text{const}$ – требуемое значение скорости движения робота по заданной траектории.

Исходя из алгоритмов управления продольным и поперечным движением, представленным в [19], получим систему уравнений, описывающую алгоритм управления траекторным движением автономного робота. Реализация принятого алгоритма предусматривает необходимость измерений относительного положения, ориентации системы и фактической скорости движения (отклонений ϵ , δ , и ΔV):

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} \left[k_s \cdot \left[\theta^* - \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \right] \cdot \cos \alpha + k_1 \cdot F_{cx1} \cdot \cos \alpha + k_2 \cdot F_{cy1} \cdot \sin \alpha \right] \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} \left[k_s \cdot \left[\theta^* - \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \right] \cdot \sin \alpha + k_1 \cdot F_{cx1} \cdot \sin \alpha + k_2 \cdot F_{cy1} \cdot \cos \alpha \right], \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{J} \left[\frac{1}{\theta^*} \left[k_{e1} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{y} - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{x} \right) + k_{e2} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot y - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot x \right) \right] + k_{\delta 1} \cdot \dot{\alpha} + \right. \\ \left. + k_{\delta 2} \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right) - \mu_c \cdot \dot{\alpha} \cdot |\dot{\alpha}| \right] \end{cases} \quad (7)$$

где k_s , k_{e1} , k_{e2} , $k_{\delta 1}$, $k_{\delta 2}$ – коэффициенты пропорциональных и дифференциальных составляющих регуляторов, которые назначаются из условия обеспечения асимптотической устойчивости системы (7) и требуемых качественных показателей переходных процессов.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования системы (7) управления движением автономного робота, реализованные средствами математического пакета Mathcad, из

различных начальных положений робота с координатами $x_0=20$, $y_0=0$, $\alpha_0=\pi$ и $x_0=10$, $y_0=35$, $\alpha_0=\pi$ представлены на рис.6, демонстрируют устойчивость системы и хорошие качественные показатели траекторного управления робота.

На рис.7 представлены графики изменения ортогональной (а) и угловой (б) ошибок во времени, которые свидетельствуют об асимптотическом достижении ими нулевых значений без перерегулирования примерно за 50 с.

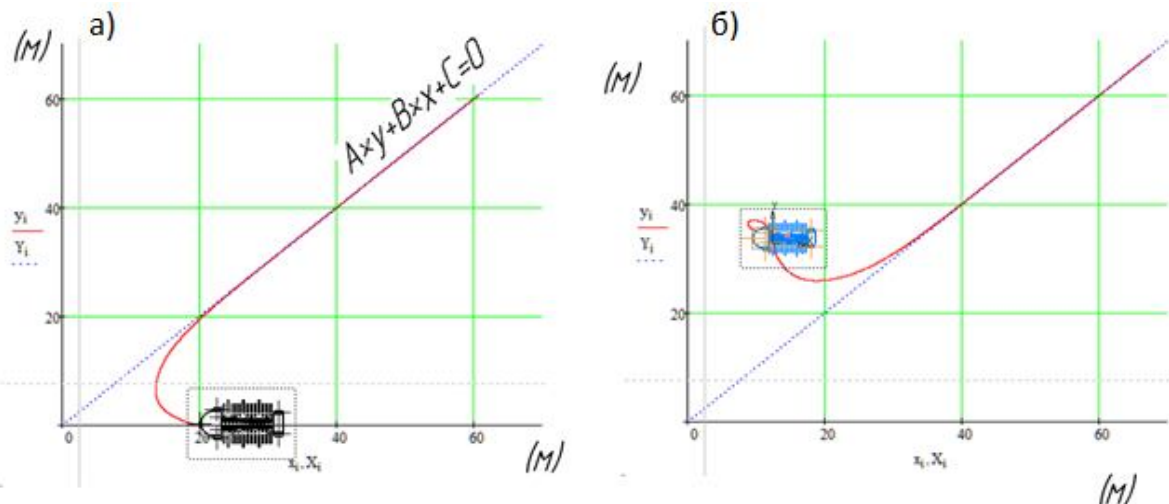


Рис. 6. Траектории движения робота из различных начальных положений:

а – $x_0=20$, $y_0=0$, $\alpha_0=\pi$; **б** – $x_0=10$, $y_0=35$, $\alpha_0=\pi$

Fig. 6. Robot trajectories from different starting positions:

а – $x_0=20$, $y_0=0$, $\alpha_0=\pi$; **б** – $x_0=10$, $y_0=35$, $\alpha_0=\pi$

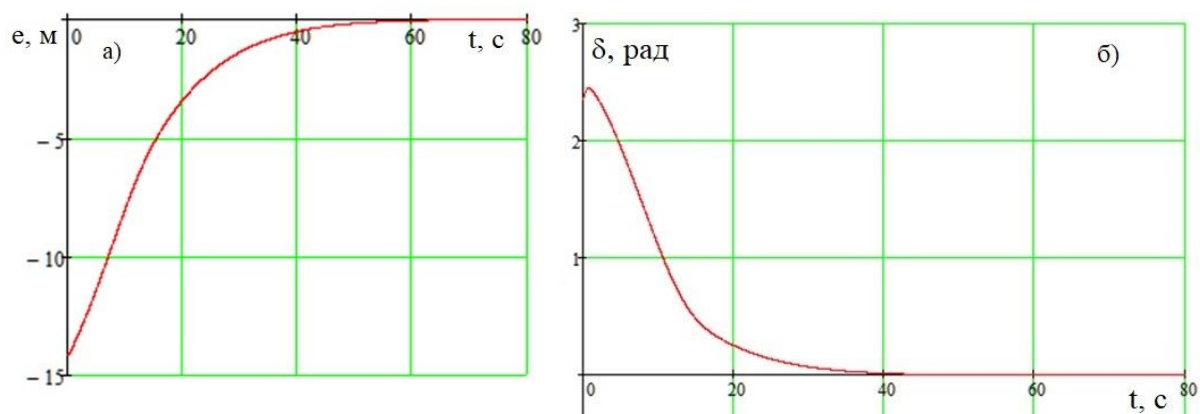


Рис. 7. Графики изменения во времени $e(t)$ – ортогональной (а) и $\delta(t)$ –угловой (б) ошибок

Fig. 7. Diagram of time change $e(t)$ – orthogonal (а) and $\delta(t)$ – angular (б) errors

На рис. 8 показаны графики изменения сил продольного (а) и поперечного (б) сопротивления во время выхода робота на заданную траекторию. Как видно из анализа этих зависимостей, по окончании маневрирования продольная сила сопротивления становится равной нулю, а поперечная – принимает установившееся значение вследствие движения с постоянной скоростью.

Таким образом, постановка и реализация задачи траекторного управления движением бионического подводного робота средствами компьютерного математического моделирования выполнена успешно с достаточной степенью адекватности и достижением требуемых качественных и количественных характеристик.

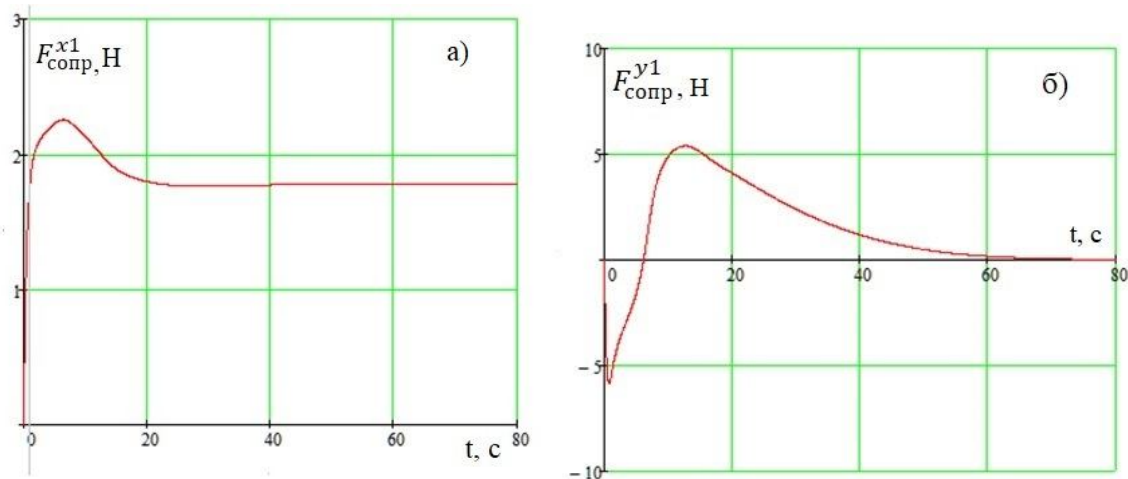


Рис. 8. Графики изменения сил продольного (а) и поперечного (б) сопротивления движению робота во времени

Fig. 8. Diagrams of the change in forces of longitudinal (а) and transverse (б) resistance to robot movement over time

Выводы

В работе рассмотрена реализация алгоритма траекторного управления АНПА бионического типа «каракатица», предназначенного для проведения разведывательных операций, боевого охранения надводных и подводных средств военно-морского флота. Представлена математическая модель движения подводного плавающего робота, реализованная в пакете Mathcad.

Система автоматического управления траекторным движением рассмотрена на примере движения робота в горизонтальной плоскости с выходом на заданную прямолинейную траекторию

и поддержания требуемого режима продольного движения с заданной скоростью. Для этого были сформированы каналы управления силами тяги, создаваемыми волнообразными движениями боковых плавников, по угловой и ортогональной ошибкам, подобраны коэффициенты регуляторов, обеспечивающие асимптотическую устойчивость системы.

Результаты моделирования показывают хорошую адекватность представленного алгоритма управления движением из различных начальных положений, демонстрируя устойчивость и требуемые показатели качества переходных процессов траекторного движения робота.

Список литературы

1. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/286>.
2. Бочаров Б.Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития// *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2009, №7(97): 62-69.

3. Развитие малых и средних автономных необитаемых подводных аппаратов на основе бионических (рыбоподобных) принципов движения для решения задач подразделений специального назначения ВМФ РФ / С.Ф. Яцун, В.И. Королёв, В.Е. Бондырев, Б.В. Лушников // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2019, 1(203): 98-109.
4. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
5. Гафуров С.А., Салмина В.А. Классификация автономных необитаемых подводных аппаратов // Перспективные системы и задачи управления: матер. одиннадцатой Всеросс. науч.-практ. конф.; в 2 т. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 110-128.
6. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // *Подводные исследования и робототехника*. 2012, 1 (13): 24-35.
7. Clair. Multi-UUV Missions Using Ranger MicroUUVs / Bryan Schulz, Brett Hobson, Mathieu Kemp, Jim Meyer, Ryan Moody, Heather Pinnix, Mathew St. // Nekton Research, LLC. 4625 Industry Lane Durham, NC 27713.
8. Madeleine: An agile AUV propelled by flexible fins. URL: https://www.researchgate.net/publication/229428877_Madeleine_An_agile_AUV_propelled_by_flexible_fins.
9. Mason R.J., J. W. Burdick Experiments in Carangiform Robotic Fish Locomotion // *Proc. of the 2000 ICRA*, 2000, pp. 428-435.
10. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion / K.A. Morgansen, V. Duindam, R.J. Mason, J.W. Burdick // *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001. pp. 427-434.
11. An Amphibious Autonomous Robot. URL: https://www.researchgate.net/publication/2961702_AQUA_An_amphibious_autonomous_robot.
12. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype / S. Jatsun, B. Lushnikov, E. Politov, S. Knyazev // *MATEC Web of Conferences*. 2017, 02014.
13. Конструктивные особенности бионического робота-рыбы / С.Ф. Яцун, Б.В. Лушников, К.Г. Казарян, Л.Ю. Ворочаева, Ворочаев А.В. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии*. 2017, 2(23): 94-102.
14. Autonomous Underwater Vehicle "Cuttlefish" // *Marine Technology Reporter*, May-June 2005, P. 51-53.
15. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 272 с.
16. Политов Е.Н., Лушников Б.В., Яцун С.Ф. Управление рыбоподобным робототехническим устройством для мониторинга объектов в гидросфере // Перспективные системы и задачи управления: материалы одиннадцатой Всероссийской научно-

практической конференции "Управление и обработка информации в технических системах". Ростов-на-Дону, 2016. С. 208-222.

17. Porez M., Boyer F., Ijspeert A.J. Improved light hill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons // *Int. J. Robot. Res.* 2014;33(10):1322-41.

18. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey // *Autonomous Robots*. 2000. 8(1): 7-24.

19. Мирошник И.В., Шалаев А.Н. Управление траекторным движением автономных роботов // *Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). Информационные, вычислительные и управляющие системы*. 2002, 6: 237-242.

20. Мирошник И.В., Фрадков А.Л., Никифоров В.О. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.

References

1. *Neobitaemye podvodnye apparaty: sostoyanie i obshchie tendentsii razvitiya* [Unmanned underwater vehicles: state and general development trends]. Available at: <https://www.electronics.ru/journal/article/286>.

2. Bocharov B.L. *Neobitaemye podvodnye apparaty: sostoyanie i obshchie tendentsii razvitiya* [Unmanned underwater vehicles: state and general development trends]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2009, №7(97): 62-69.

3. Yatsun S.F., Korolev V.I., Bondyrev V.E., Lushnikov B.V. Razvitie malykh i srednikh avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na osnove bionicheskikh (rybopodobnykh) printsipov dvizheniya dlya resheniya zadach podrazdelenii spetsial'nogo naznacheniya VMF RF [The development of small and medium autonomous uninhabited underwater apparats on the basis of bionic (fish-like) movement principles for the task of special forces of the Navy of the Russian Federation]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Southern Federal University*. 2019, 1(203): 98-109.

4. Ageev M.D. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologi* [Autonomous underwater robots. Systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 400 p.

5. Gafurov S.A., Salmina V.A. Klassifikatsiya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. Odinnadtsatoi Vseross. nauch.-prakt. konf.* [Promising management systems and tasks. Mater. Eleventh All-Russian. scientific-practical. conf.]. Rostov-Don, 2016, vol. 1, pp. 110-128.

6. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Sravnitel'nyi analiz i optimizatsiya dinamicheskikh svoistv avtonomnykh podvodnykh robotov razlichnykh proektov i konfiguratsii [Compara-

tive analysis and optimization of dynamic properties of autonomous underwater robots of various designs and configurations]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*. 2012, 1 (13): 24-35.

7. Bryan Schulz, Brett Hobson, Mathieu Kemp, Jim Meyer, Ryan Moody, Heather Pinnix, Mathew St. Clair. Multi-UUV Missions Using Ranger MicroUUVs. *Nekton Research, LLC*. 4625 Industry Lane Durham, NC 27713.

8. Madeleine: An agile AUV propelled by flexible fins. Available at: https://www.researchgate.net/publication/229428877_Madeleine_An_agile_AUV_propelled_by_flexible_fins.

9. Mason R.J., Burdick J. W. Experiments in Carangiform Robotic Fish Locomotion. *Proc. of the 2000 ICRA*, 2000. pp. 428-435.

10. Morgansen K.A., Duindam V., Mason R.J., Burdick J.W. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, pp. 427-434.

11. An Amphibious Autonomous Robot. Available at: https://www.researchgate.net/publication/2961702_AQUA_An_amphibious_autonomous_robot.

12. Jatsun S., Lushnikov B., Politov E., Knyazev S. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype. *MATEC Web of Conferences*. 2017, 02014.

13. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Kazaryan K.G., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Konstruktivnye osobennosti bionicheskogo robota-ryby [Design features of bionic robot fish]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2017, 2(23): 94-102.

14. Autonomous Underwater Vehicle "Cuttlefish". *Marine Technology Reporter*, May-June 2005, pp. 51-53.

15. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* [Underwater robot control devices and systems]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 272 p.

16. Politov E.N., Lushnikov B.V., Yatsun S.F. Upravlenie rybopodobnym robototekhnicheskim ustroystvom dlya monitoringa ob"ektov v gidrosfere [Control of fish-like robotic device for monitoring objects in the hydrosphere]. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya. Materialy Odinnadtsatoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* [Promising management systems and objectives. Materials of the Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference "Information Management and Processing in Technical Systems"]. Rostov-na-Donu, 2016, pp. 208-222.

17. Porez M., Boyer F, Ijspeert A.J. Improved light hill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons. *Int. J. Robot. Res.* 2014; 33(10): 1322-41.
18. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*. 2000. 8(1): 7-24.
19. Miroshnik I.V., Shalaev A.N. Upravlenie traektornym dvizheniem avtonomnykh robotov [Autonomous Robot Trajectory Control]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik SPb GITMO (TU). Informatsionnye, vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy = Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg GITMO (TU). Information, Computing and Control Systems*. 2002, 6: 237-242.
20. Miroshnik I.V., Fradkov A.L. Nikiforov V.O. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. St. Petersburg, NaukaPubl., 2000, 549 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Лушников Борис Владимирович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bvl_61@inbox.ru, ORCID: <https://orcid/0000-0003-2288-2991>, Researcher ID: G-8554-2013

Boris V. Lushnikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bvl_61@inbox.ru, ORCID: <https://orcid/0000-0003-2288-2991>, Researcher ID: G-8554-2013

Трофимов Владимир Викторович, магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovan.trofimov@inbox.ru

Vladimir V. Trofimov, Master's Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovan.trofimov@inbox.ru

Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности

В.Г. Андронов¹ ✉, А.А. Чуев¹, И.С. Юдин¹

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка методики определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

Методы. Методика основана на функциональной связи между параметрами отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории и изменениями продольных и поперечных параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности, обусловленными этими отклонениями. При математическом описании вычислительных процедур определения параметров отклонений использовались методы аппроксимации функций и математической обработки результатов измерений с оценкой точности полученных результатов.

Результаты. Разработана методика, включающая в себя контроль, оценку уровня и определения величины и направления отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории. Получена система нелинейных уравнений, описывающая функциональную связь между параметрами отклонений и изменениями параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности. Выполнены процедуры линеаризации, нормализации и решения этой системы уравнений по методу наименьших квадратов, получены аналитические соотношения для апостериорной оценки точности получаемых результатов.

Заключение. Методика обеспечивает обнаружение и определение параметров некоординированных отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории с точностью, соизмеримой с методами спутниковой навигации. Предложенный подход по сравнению с известными методиками позволяет уменьшить число обрабатываемых соответственных точек на перекрывающихся изображениях и размерность решаемой задачи. Это позволяет существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат, что имеет большое значение для использования разработанной методики на борту малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: автономная навигация; беспилотный летательный аппарат; параллакс изображений; аэрофотосъемка.

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

Для цитирования: Андронов В.Г., Чуев А.А., Юдин И.С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 122-141. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-122-141>.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Подписана в печать 17.05.2022

Опубликована 29.07.2022

Methodology for Determining Deviations of Pilotless Aircraft from a Given Trajectory by Parallaxes of Underlying Surface Images

Vladimir G. Andronov ¹ ✉, Andrey A. Chuev ¹, Ilya S. Yudin ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: vladia58@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a methodology for determining deviations of pilotless aircrafts from a given trajectory in conditions of signals loss from navigation satellites.

Methods. The technique is based on functional relationship between deviation parameters of pilotless aircrafts from a given trajectory and changes in longitudinal and transverse parallaxes of overlapping images of the underlying surface due to these deviations. Mathematical description of computational procedures for deviation parameters determination used methods of functions approximation and mathematical processing of measurement results with accuracy estimation of obtained results.

Results. A methodology that includes monitoring, assessing the level and determining the magnitude and direction of deviations of pilotless aircrafts from a given trajectory was developed. A system of nonlinear equations describing functional relationship between deviation parameters and changes in parallax of overlapping images of the underlying surface is obtained. Linearization, normalization and solutions of this system of equations by the least squares method were performed. Analytical relations were obtained for a posterior accuracy assessment of the obtained results.

Conclusion. The technique provides parameters detection and determination of uncoordinated deviations of pilotless aircrafts from a given trajectory with an accuracy commensurate with satellite navigation methods. The proposed approach makes it possible to reduce the number of processed corresponding points in overlapping images and the dimension of the problem being solved in comparison with known methods. This significantly reduces the level of computational and resource costs, which is of great importance for the use of developed technique on the board of miniature pilotless aircrafts

Keywords: autonomous navigation; pilotless aircrafts; parallax of images; aerial photography.

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

For citation: Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for Determining Deviations of Pilotless Aircraft from a Given Trajectory by Parallaxes of Underlying Surface Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 122-141 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-122-141>.

Received 30.03.2022

Accepted 17.05.2022

Published 29.07.2022

Введение

Для автоматического управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) используются параметры их текущего положения и ориентации, которые измеряются, как правило, датчиками контура инерциальной навигации. Основным недостатком инерциальных систем является существенная зависимость точности от длительности автономной работы. Это обусловлено принципами их работы и связано с накоплением ошибок измерений. Известно, что из-за ограничений по весу и габаритам наиболее высокая скорость накопления ошибок характерна для мини БЛА. Например, уже через несколько минут автономного полёта мини БЛА весом 2–4 кг точность инерциальных измерений ухудшается в два-три раза [1]. В условиях внешних возмущений (прерывистые порывы ветра, восходящий поток, воздушная яма и т.п.) это может привести к возникновению некоординированных отклонений БЛА и существенному отклонению маршрута его полёта от заданной траектории. Поэтому при высоких требованиях к точности выхода БЛА на заданную точку траектории в районе выполнения целевых задач инерциальная навигационная система БЛА, как правило, интегрируется со спутниковой навигационной системой, по сигналам которой выполняется коррекция инерциальных измерений [2-6]. Вместе с тем известно [7-10], что в про-

цессе полёта БЛА не исключены потери сигналов от навигационных спутников.

В этой связи актуальной является задача коррекции инерциальных измерений ориентации и положения БЛА по дополнительной автономной информации в случае потери сигналов от навигационных спутников. Для решения этой задачи широко применяются различные методы, в том числе обработки изображений подстилающей поверхности [11]. В данной работе рассматривается новая методика определения отклонений БЛА от заданной траектории по параллаксам текущих изображений подстилающей поверхности.

Материалы и методы

Постановка задачи

Будем считать, что БЛА совершает движение по заданной траектории, которая представляет собой прямолинейный маршрут, параллельный плоскости местного горизонта, и характеризуется отсутствием программных маневров по направлению и высоте полёта. При этом система автоматического управления БЛА функционирует в режиме стабилизации и с требуемой точностью отрабатывает некоординированные отклонения БЛА от заданной траектории. Для этого датчиками инерциальной навигационной системы измеряются параметры полёта БЛА, а также выполняется коррекция их значений по сигналам навигационных спутников. Наряду с

этим навигационными измерениями цифровой фотокамерой, установленной на борту БЛА, осуществляется регистрация и фотограмметрическая обработка (рис.1) перекрывающихся изоб-

ражений P_j подстилающей поверхности, где $j = \overline{1, J}$. При этом зоны перекрытия имеют только смежные пары снимков P_j, P_{j+1} , а коэффициент их перекрытия k_p априорно известен.

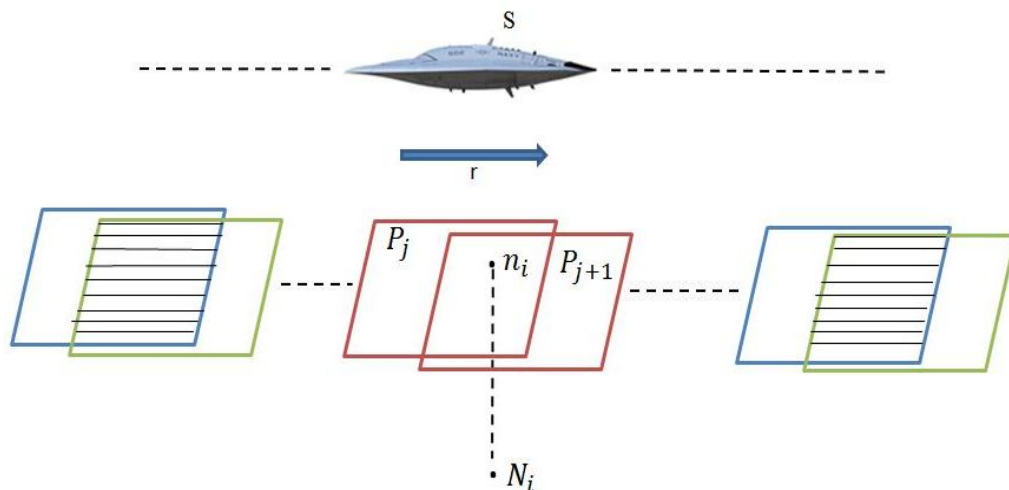


Рис. 1. Режим горизонтального полёта БЛА

Fig. 1. PLA horizontal flight mode

Допустим далее, что в какой-то момент полёта БЛА по заданной траектории произошла потеря сигналов от навигационных спутников, а ещё через некоторое время, например, после получения снимка $P_{j+1} = P1$, возникли неkoordinированные отклонения БЛА (рис. 2), в условиях которых был получен перекрывающийся с ним снимок $P_{j+2} = P2$. Поскольку снимок P1 получен в режиме горизонтального полёта БЛА по заданной траектории r_1 , а P2 – в условиях отклонений БЛА и движения по новой траектории r_2 , первое изображение будем называть горизонтальным, а второе – наклонным. Введём угловые и линейные параметры, характеризую-

щие величину и направления отклонений БЛА от заданной траектории r_1 .

Угол тангажа ν – угол между продольной осью БЛА, совпадающей с траекторией r_2 , и траекторией r_1 , параллельной плоскости местного горизонта; угол крена ω – угол между поперечной осью БЛА и плоскостью местного горизонта; угол рыскания τ – угол между продольной осью БЛА при горизонтальной траектории полёта БЛА и её проекцией на горизонтальную плоскость при наклонной траектории.

На рис. 2 видно, что параметры угловых отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полёта в то же время являются углами взаимной ориентации снимков P1 и P2.

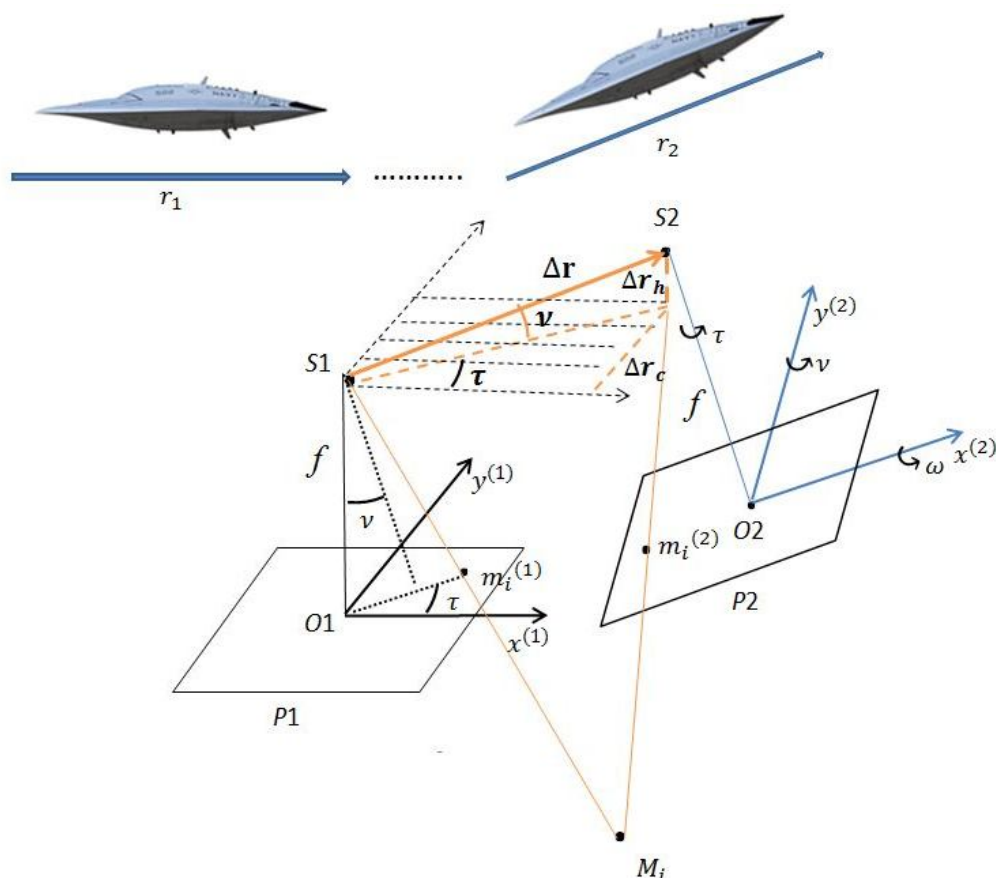


Рис. 2. Взаимная ориентация изображений P_1 и P_2

Fig. 2. Mutual orientation of images P_1 and P_2

К параметрам линейных отклонений БЛА от заданной траектории будем относить отклонения $\Delta r_c, \Delta r_h$ траектории r_2 от r_1 по направлению и высоте полёта БЛА.

Положим также, что в результате инерциальных измерений и последовательной фотограмметрической обработки смежных пар снимков $\{<P_j, P_{j+1}>\}$, получаемых при движении БЛА по заданной траектории r_1 , а также снимков P_1 и P_2 , определены следующие параметры:

- плоские координаты $\{<x_i^{(j)}, y_i^{(j)}>\}$ точек $\{n_j\}$ в системе координат горизонтальных снимков P_j ;

- продольные и поперечные параллаксы $\{<p_i^{(j,j+1)}, q_i^{(j,j+1)}>\}$ смежных пар горизонтальных снимков P_j, P_{j+1} ;

- плоские координаты $\{<(x_i^{(1)}, y_i^{(1)})>, <(x_i^{(2)}, y_i^{(2)})> | i = \overline{1, I}\}$ соответственных точек $m_i^{(1)}$ и $m_i^{(2)}$, изобразившихся на снимках P_1 и P_2 ;

- продольный и поперечный параллаксы $p_i^{(1,2)}, q_i^{(1,2)}$ снимков P_1, P_2 ;

- фокусное расстояние f цифровой камеры;

- расстояние Δr_s между центрами проекций S_1 и S_2 в плоскости местного горизонта;

– углы тангажа ν , крена ω и рыскания БЛА τ , измеренные штатными средствами инерциальной навигационной системы в момент времени получения снимка P_2 .

Задача заключается в определении значений параметров ν , ω , τ и $\Delta r_c, \Delta r_h$ по результатам раздельной фотограмметрической обработки снимков $\{<P_j, P_{j+1}>\}$ и снимков P_1, P_2 .

Методика решения задачи

Известно [13], что для любой соответственной точки i в каждой паре смежных горизонтальных снимков $j, j+1$ в соответствии с определением параллаксов должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} p_i^{(j,j+1)} = x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)} = \text{const}; \\ q_i^{(j,j+1)} = y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Из (1) следует, что отличие от нуля разностей параллаксов $(p_i^{(j+1,j+2)} - p_i^{(j,j+1)})$, $(q_i^{(j+1,j+2)} - q_i^{(j,j+1)})$ каких-либо смежных пар снимков говорит о том, что возникли некоординированные отклонения БЛА от заданной траектории горизонтального полёта БЛА.

Выражения для расчёта разностей параллаксов $\Delta p_i, \Delta q_i$ пары горизонтальных снимков P_j, P_{j+1} и смежной с ней пары снимков $P_1=P_{j+1}, P_2=P_{j+2}$ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p_i = (x_i^{(1)} - x_i^{(2)}) - (x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)}); \\ \Delta q_i = (y_i^{(1)} - y_i^{(2)}) - (y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)}). \end{cases} \quad (2)$$

Пусть далее имеется виртуальный снимок $\bar{P}_2$, полученный путём трансформирования наклонного снимка P_2 в горизонтальную проекцию по элементам $a_{11}(\nu, \omega, \tau), \dots, a_{33}(\nu, \omega, \tau)$ матрицы направляющих косинусов, описывающим взаимную ориентацию этих снимков. Очевидно, что изображение точки M_i земной поверхности будет находиться в зоне перекрытия пары горизонтальных снимков $P_1, \bar{P}_2$ и в соответствии с (1) справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} x_i^{(j)} - x_i^{(j+1)} = x_i^{(1)} - \bar{x}_i^{(2)}; \\ (y_i^{(j)} - y_i^{(j+1)}) = y_i^{(1)} - \bar{y}_i^{(2)}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{x}_i^{(2)}, \bar{y}_i^{(2)}$ – плоские координаты точки M_i в системе координат снимка $\bar{P}_2$.

Сравнивая выражения (2) и (3), получим:

$$\begin{cases} \Delta p_i = \bar{x}_i^{(2)} - x_i^{(2)}; \\ \Delta q_i = \bar{y}_i^{(2)} - y_i^{(2)}. \end{cases} \quad (4)$$

Подставим в (4) известные соотношения [12] между плоскими координатами соответственных точек горизонтального и наклонного снимков, полученных из одного центра проекции. Имеем:

$$\begin{cases} \Delta p_i = -x_i^{(2)} - f \frac{a_{11}x_i^{(2)} + a_{12}y_i^{(2)} - a_{13}f}{a_{31}x_i^{(2)} + a_{32}y_i^{(2)} - a_{33}f}; \\ \Delta q_i = -y_i^{(2)} - f \frac{a_{21}x_i^{(2)} + a_{22}y_i^{(2)} - a_{23}f}{a_{31}x_i^{(2)} + a_{32}y_i^{(2)} - a_{33}f}. \end{cases} \quad (5)$$

Применив к тригонометрическим функциям $a_{11}(\nu, \omega, \tau), \dots, a_{33}(\nu, \omega, \tau)$ методы аппроксимации так, как это показано в работе [13], после алгебраических преобразований получим:

$$\begin{cases} \Delta p_i = \frac{1}{2} x_i^{(2)} (\omega^2 - \tau^2) + f v - y_i^{(2)} \tau + x_i^{(2)} v^2 + \frac{(x_i^{(2)})^2}{f} (v + \omega \tau) - \frac{(y_i^{(2)})^2}{f} \omega \tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} (\omega - 2v\tau); \\ \Delta q_i = y_i^{(2)} \frac{1}{2} (v^2 - \tau^2) + f \omega + x_i^{(2)} (v \omega - \tau) + y_i^{(2)} \omega^2 + \frac{(y_i^{(2)})^2}{f} (\omega - v\tau) + \frac{x_i^{(2)}}{f} v\tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} (v + 2\omega\tau). \end{cases} \quad (6)$$

Из выражений (6) следует, что при $v = \omega = \tau = 0$, то есть при отсутствии отклонений БЛА от заданной траектории, справедливы соотношения $\Delta p_i = \Delta q_i = 0$. Поэтому система уравнений (6) описывает зависимость изменений параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности от величины возникающих угловых отклонений БЛА от заданной траектории прямолинейного горизонтального полёта. Известные подходы к описанию этой зависимости [14] основаны на построении сложного функционала с громоздкими, в том числе тригонометрическими, выражениями. Разработанная модель (6) позволяет в два раза сократить число соответственных точек, необходимых для организации корректной математической обработки резуль-

татов измерений, и существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат.

Для решения поставленной задачи в части определения параметров v , ω , τ разложим нелинейные уравнения (6) в ряд Тейлора и, ограничившись только линейными членами, получим:

$$\begin{aligned} d(\Delta p_i) &= \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} dv + \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} d\tau; \\ d(\Delta q_i) &= \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} dv + \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} d\tau. \end{aligned}$$

Представим эту систему линеаризованных уравнений в матрично-векторной форме:

$$\begin{bmatrix} d(\Delta p_i) \\ d(\Delta q_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dv \\ d\omega \\ d\tau \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Дифференцируя уравнения (6), найдём частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} &= 2x_i^{(2)} v - 2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} \tau + \left(f + \frac{(x_i^{(2)})^2}{f} \right); \\ \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} &= x_i^{(2)} \omega + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) \tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f}; \\ \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} &= -2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} v + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) \omega + x_i^{(2)} \tau - y_i^{(2)}; \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} &= y_i^{(2)} v + x_i^{(2)} \omega + \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) \tau + \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f}; \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} &= x_i^{(2)} v + 2y_i^{(2)} \omega + 2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} \tau + \left(f + \frac{(y_i^{(2)})^2}{f} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} = \left(\frac{x_i^{(2)} - y_i^{(2)}}{f} \right) v + 2 \frac{x_i^{(2)} y_i^{(2)}}{f} \omega + y_i^{(2)} \tau - x_i^{(2)}.$$

Составим уравнение поправок, соответствующее линеаризованному уравнению (7). Пусть $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$ – приближённые значения углов тангажа, крена и рыскания БЛА; $\Delta p_i^0, \Delta q_i^0$ – разности параллакс-ов снимков P1, P2 и смежной с ней предыдущей пары горизонтальных изображений, полученные по измеренным координатам соответственных точек, а $\Delta \tilde{p}_i, \Delta \tilde{q}_i$ – приближённые значения этих разностей параллакс-ов.

Тогда вектор

$$\bar{\epsilon}_i = \begin{pmatrix} \Delta p_i^0 - \Delta \tilde{p}_i \\ \Delta q_i^0 - \Delta \tilde{q}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_i^p \\ \epsilon_i^q \end{pmatrix} \quad (9)$$

будет вектором свободных членов, а в качестве вектора поправок в значения $\Delta p_i^0, \Delta q_i^0$ примем вектор

$$\bar{\mathbf{g}}_i = \begin{pmatrix} g_i^p \\ g_i^q \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Учитывая изложенное, уравнение поправок для каждой точки i , соответствующее линеаризованному уравнению (7), будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_i \Delta \bar{\mathbf{U}}_i = \bar{\epsilon}_i + \bar{\mathbf{g}}_i, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_i)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_i)}{\partial \tau} \end{bmatrix}$$

– матрица частных производных;

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_i = \begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \\ \Delta \tau \end{pmatrix} \text{ – вектор поправок к}$$

приближённым значениям $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$.

В уравнении (11) компоненты $\Delta \tilde{p}_i, \Delta \tilde{q}_i$ вектора $\bar{\epsilon}_i$ и элементы матрицы $\mathbf{M}_i$ вычисляются соответственно по формулам (6) и (8) при приближённых значениях углов $\tilde{v}, \tilde{\omega}, \tilde{\tau}$. При этом размерность уравнения поправок (11) определяется размерностью свободного члена $\bar{\epsilon}_i$, а именно в миллиметрах. Поэтому углы тангажа, крена и рыскания БЛА в уравнениях (6), (8) и поправки к ним в (11) должны быть выражены в радианах, а плоские координаты $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$ i -й точки и фокусное расстояние f цифровой камеры – в миллиметрах.

Для каждой точки i с плоскими координатами $x_i^{(2)}, y_i^{(2)}$, находящейся в зоне перекрытия изображений P1 и P2, можно составить два уравнения поправок. Тогда структура общей системы уравнений поправок в векторно-матричной форме для всех включенных в обработку точек с порядковыми номерами $i = \overline{1, I}$ будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{M}_{[2I, 3]} \Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3, 1>} = \bar{\epsilon}_{<2I, 1>} + \bar{\mathbf{g}}_{<2I, 1>}, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{M}_{[2I, 3]} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_1)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_1)}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta p_I)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial v} & \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial \omega} & \frac{\partial(\Delta q_I)}{\partial \tau} \end{bmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{U}_{<3,1>} = \begin{pmatrix} \delta v \\ \delta \omega \\ \delta \tau \end{pmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{e}}_{<2I,1>} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1^p \\ \varepsilon_1^q \\ \vdots \\ \varepsilon_I^p \\ \varepsilon_I^q \end{pmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{g}}_{<2I,1>} = \begin{pmatrix} g_1^p \\ g_1^q \\ \vdots \\ g_I^p \\ g_I^q \end{pmatrix}.$$

В соответствии с методом наименьших квадратов для решения задачи определения углов тангажа, крена и рыскания БЛА необходимо иметь переопределённую систему уравнений поправок (12), для чего требуется выделить в зоне перекрытия не менее двух точек. При этом итерационный процесс решения системы уравнений (12) производится по формуле

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi) = (\mathbf{M}_{[3,2I]}^T \cdot \mathbf{M}_{[2I,3]})_{(\xi)}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{[3,2I]}^T \bar{\mathbf{e}}_{<2I,1>}(\xi), \quad (13)$$

где ξ – порядковый номер итерации.

В процессе решения поправки $\Delta v, \Delta \omega, \Delta \tau$ находятся до тех пор, пока в какой-либо итерации $(\xi + 1)$ не выполнится условие

$$\Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi+1) - \Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi) \leq (\delta v, \delta \omega, \delta \tau)_{\text{доп}}^T, \quad (14)$$

где $(\delta v, \delta \omega, \delta \tau)_{\text{доп}}^T$ – заданная априорно точность вычислений.

Оценка точности полученных решений производится по формуле

$$\sigma \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi+1) = \sigma_0 \sqrt{\text{diag}[(\mathbf{M}_{[3,2I]}^T \mathbf{M}_{[2I,3]})_{(\xi+1)}^{-1}]} \quad (15)$$

Параметр σ_0 представляет собой ошибку единицы веса измерений и вычисляется следующим образом. Полученные в заключительной итерации $(\xi + 1)$ значения элементов матрицы $\mathbf{M}_{[2I,3]}(\xi+1)$, компонент векторов свободных членов $\bar{\mathbf{e}}_{<2I,1>}(\xi+1)$ и поправок $\Delta \bar{\mathbf{U}}_{<3,1>}(\xi+1)$ подставляют в уравнение (8) и находят значения компонент вектора $\bar{\mathbf{g}}_{<2I,1>}(\xi+1)$, после чего σ_0 определяют по формуле

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\bar{\mathbf{g}}_1^p{}^T \bar{\mathbf{g}}_1^p{}^T \bar{\mathbf{g}}_1^q{}^T \bar{\mathbf{g}}_1^q{}^T}{2I-3}} = \sqrt{\frac{(g_1^p)^2 + (g_1^q)^2 + \dots + (g_I^p)^2 + (g_I^q)^2}{2I-3}}. \quad (16)$$

Решение задачи в части определения параметров $\Delta r_c, \Delta r_h$ выполняется по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta r_c &= \Delta r_S \tan \tau; \\ \Delta r_h &= \Delta r_S (\tan \nu / \cos \tau), \end{aligned} \quad (17)$$

где Δr_S – расстояние между центрами проекций $S1$ и $S2$ в плоскости местного горизонта.

Результаты и их обсуждение

Разработанная методика включает в себя три этапа решения поставленной задачи (рис. 3): калибровка параллаксов, контроль уровня отклонений БЛА от заданной траектории и определение параметров отклонений БЛА.

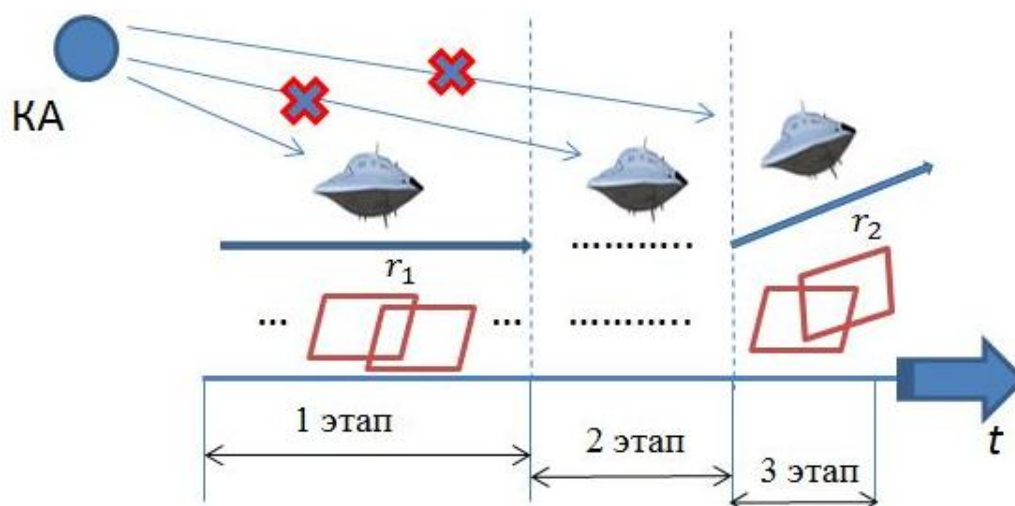


Рис. 3. Иллюстрация к методике

Fig. 3. Illustration of the method

На каждом этапе выполняются процедуры анализа и обработки изображений, связанные с поиском и отождествлением соответственных точек в зонах перекрытия изображений подстилающей поверхности, вычислительные процедуры расчёта их плоских координат, параллаксов, разностей параллаксов и ряд других простых алгебраических операций. На первом этапе к ним добавляются вычислительные процедуры калибровки параллаксов, а на третьем – решения системы нелинейных уравнений по методу наименьших квадратов. Рассмотрим содержание этих процедур более подробно.

На первом этапе в штатном режиме прямолинейного горизонтального полёта БЛА по траектории r_1 производится регистрация и обработка перекрывающихся горизонтальных изображений. В соответствии с этим в зонах перекрытия каждой пары снимков последовательно выполняются автоматические процедуры задания и определе-

ния пиксельных координат двух точек. Плоские координаты $x_i^{(j)}, y_i^{(j)}$ точек в зонах перекрытия пар снимков рассчитываются по порядковым номерам пикселей, содержащих изображения этих точек. На первых снимках смежных пар порядковые номера пикселей этих точек задаются по известному коэффициенту перекрытия, причём одна из них выбирается в положительной, а другая – в отрицательной части их осей ординат. На вторых снимках осуществляется поиск и отождествление этих точек корреляционными методами.

Далее по мере определения координат точек производится вычисление параллаксов $p_{\text{ши}}^{(j,j+1)}, q_{\text{ши}}^{(j,j+1)}$ смежных пар изображений и их разностей

$$\Delta p_{\text{ши}}^{(j)} = p_{\text{ши}}^{(j+1,j+2)} - p_{\text{ши}}^{(j,j+1)},$$

$$\Delta q_{\text{ши}}^{(j)} = q_{\text{ши}}^{(j+1,j+2)} - q_{\text{ши}}^{(j,j+1)},$$

где обозначение «ш» в нижних индексах свидетельствует о том, что снимки получены в штатном режиме полёта БЛА.

По условиям задачи считается, что система навигации БЛА на первом этапе функционирует в штатном режиме с использованием сигналов от навигационных спутников и обеспечивает заданную точность определения и стабилизации параметров заданной траектории. Вместе с тем, очевидно, что в штатном режиме полёта БЛА вследствие имеющихся ошибок навигации БЛА условия (1) будут выполняться с априорно неизвестной погрешностью.

Для оценки величины этой погрешности производится калибровка полученных значений параллаксов, под которой понимается определение степени нарушения условий (1), то есть степени отличий реальных значений $\Delta p_{\text{ши}}^{(j)}, \Delta q_{\text{ши}}^{(j)}$ от нуля, а также задание коэффициента γ , устанавливающего допустимый уровень $\Delta p_{\text{доп}}, \Delta q_{\text{доп}}$ этих отличий.

С этой целью в конце первого этапа по всем точкам смежных пар снимков вычисляются математические ожидания разностей параллаксов $\Delta \bar{p}_{\text{ш}}, \Delta \bar{q}_{\text{ш}}$ и задаются значения допустимого уровня их отличий от нуля:

$$\begin{cases} \Delta \bar{p}_{\text{ш}} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta p_{\text{ши}}^{(j)}; \\ \Delta \bar{q}_{\text{ш}} = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta q_{\text{ши}}^{(j)}. \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \Delta p_{\text{доп}} = \gamma \Delta \bar{p}_{\text{ш}}; \\ \Delta q_{\text{доп}} = \gamma \Delta \bar{q}_{\text{ш}}. \end{cases} \quad (19)$$

На втором этапе, который наступает с потерей сигналов от спутников и характеризуется быстро нарастающим уровнем снижения точности инерциальных измерений, выполняется кон-

троль и оценка уровня отклонений БЛА от заданной траектории. Для этого в том же порядке, как на первом этапе, выполняются процедуры анализа и обработки изображений, а также вычислительные процедуры расчёта плоских координат точек, параллаксов и разностей параллаксов $\Delta p_i^{(j)}, \Delta q_i^{(j)}$ смежных пар снимков. При этом к ним добавляются операции последовательного сравнения значений $\Delta p_i^{(j)}, \Delta q_i^{(j)}$ и $\Delta p_{\text{доп}}, \Delta q_{\text{доп}}$ по формуле

$$\begin{cases} \Delta p_i^{(j)} \leq \Delta p_{\text{доп}}; \\ \Delta q_i^{(j)} \leq \Delta q_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (20)$$

Нарушение условий (20), возникшее при обработке каких-либо смежных пар снимков $P_J, P1$ и $P1, P2$, считается моментом завершения второго этапа и является критерием превышения допустимого уровня некоординированных отклонений БЛА от заданной траектории.

На третьем заключительном этапе производятся вычислительные процедуры математической обработки результатов фотограмметрических и инерциальных измерений, выполненных после регистрации снимков $P1$ и $P2$. Математическая обработка осуществляется в соответствии с формулами (6), (8) – (16) путём решения системы нелинейных уравнений по методу наименьших квадратов и вычислений по формулам (1). Этап заканчивается выдачей в систему управления БЛА значений параметров его угловых и линейных отклонений $v^*, \omega^*, \tau^*, \Delta r_c, \Delta r_h$.

Для оценки работоспособности предлагаемой методики были проведены экспериментальные исследования на макет-

ных снимках, построенных на основе характеристик цифровой камеры Nikon P700 [15] которые представлены в табл.1.

Таблица 1. Характеристики цифровой камеры Nikon P700 и съёмки

Table 1. Characteristics of the Nikon P700 digital camera and shooting

Параметры цифровой камеры/ Digital camera parameters	Параметры съёмки/ Shooting parameters
Матрица ПЗС: Длина: 8 мм; Ширина: 6 мм. Число пикселей: 3648 на 2736. Размер пикселя: $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм. Фокусное расстояние: 2,4 мм.	Высота съёмки: 285 м. Расстояние $S_1 S_2$: 95 м. Коэффициент перекрытия горизонтальных снимков в штатном режиме горизонтального полёта: $k_p = 0,5$ (50%).

Макетные снимки включали в себя смежные пары горизонтальных снимков $(P_1, P_2); \dots; (P_{j-1}, P_j), (P_j, P_1)$ и пару горизонтального и наклонного снимков P_1, P_2 , смежную с парой (P_j, P_1) . Графическая иллюстрация горизонтальных макетных снимков P_1 представлена рис.4, снимков P_1, P_2 – на рис.5, а их характеристики – в табл.2.

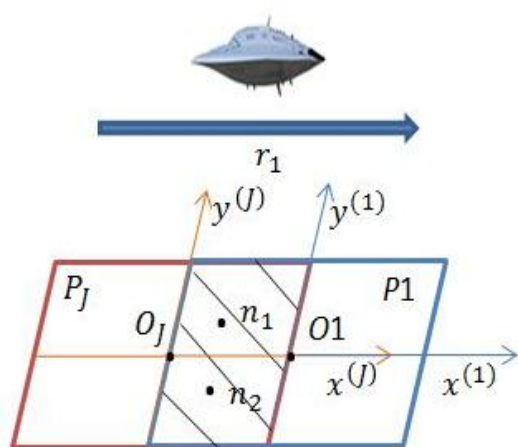


Рис. 4. Горизонтальные снимки P_j, P_1

Fig. 4. Horizontal snapshots P_j, P_1

Значения параметров макетных снимков формировались следующим образом. На паре горизонтальных снимков P_j и P_1 в зоне их перекрытия были выбраны точки n_1, n_2 , а в зоне перекрытия пары P_1, P_2 – точки m_1, m_2 .

Плоские координаты точек n_1, n_2 на снимках $P_1, P_2, \dots, P_j$ и P_1 и точек m_1, m_2 на снимке P_1 задавались, исходя из формата этих снимков и коэффициента перекрытия k_p горизонтальных снимков в штатном режиме полёта. Значения плоских координат $x_1^{(2)}, y_1^{(2)}; x_2^{(2)}, y_2^{(2)}$ точек m_1 и m_2 на наклонном снимке P_2 моделировались путём трансформации их горизонтальных координат $\bar{x}_1^{(2)} = \bar{x}_2^{(2)} = -x_1^{(1)} = -x_1^{(2)}, \bar{y}_1^{(2)} = y_1^{(1)}, \bar{y}_2^{(2)} = y_2^{(1)}$ при заданных значениях углов ν, ω, τ .

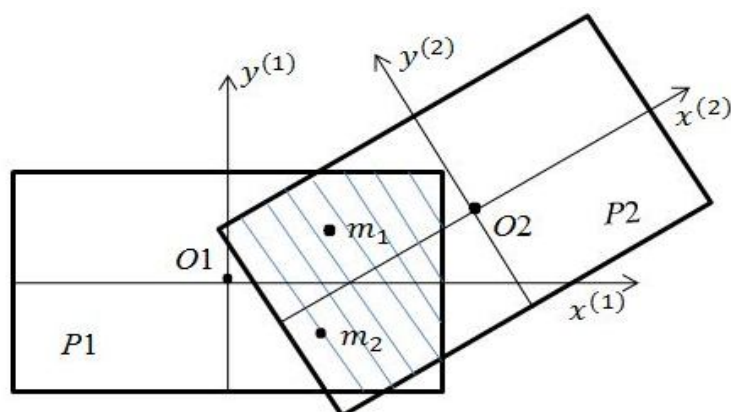
Рис. 5. Горизонтальный и наклонный снимки P_1, P_2 Fig. 5. Horizontal and oblique shots P_1, P_2

Таблица 2. Параметры макетных снимков

Table 2. Layout image parameters

Формат снимков $P_1, P_2, \dots, P_J, P_1$ / Snapshot format $P_1, P_2, \dots, P_J, P_1$	Плоские координаты / Flat coordinates	
	Снимки P_J и P_1 / Snapshots of P_J and P_1	Снимки P_1, P_2 / Snapshots of P_1, P_2
$-4 \text{ мм} \leq x^{(j)}, x^{(1)} \leq 4 \text{ мм};$ $-3 \text{ мм} \leq y^{(j)}, y^{(1)} \leq 3 \text{ мм};$ Параллаксы $p_{\text{ши}}^{(1,2)} = \dots = p_{\text{ши}}^{(J-1,J)} = 4 \text{ мм}$	Точка n_1 : $x_1^{(j)} = 2 \text{ мм}$ $y_1^{(j)} = 1,5 \text{ мм}$ $x_1^{(1)} = -2 \text{ мм}$ $y_1^{(1)} = 1,5 \text{ мм}$ Точка n_2 : $x_2^{(j)} = 2 \text{ мм}$ $y_2^{(j)} = -1,5 \text{ мм}$ $x_2^{(1)} = -2 \text{ мм}$ $y_2^{(1)} = -1,5 \text{ мм}$ Параллаксы $p_{\text{ши}1}^{(j,1)} = 4 \text{ мм}$ $p_{\text{ши}2}^{(j,1)} = 4 \text{ мм}$ $q_{\text{ши}1}^{(j,1)} = 0 \text{ мм}$ $q_{\text{ши}2}^{(j,1)} = 0 \text{ мм}$	Точка m_1 : $x_1^{(1)} = 2 \text{ мм}$ $y_1^{(1)} = 1,5 \text{ мм}$ $x_1^{(2)} = -2,134 \text{ мм}$ $y_1^{(2)} = 1,51 \text{ мм}$ Точка m_2 : $x_2^{(1)} = 2 \text{ мм}$ $y_2^{(1)} = -1,5 \text{ мм}$ $x_2^{(2)} = -2,656 \text{ мм}$ $y_2^{(2)} = -1,712 \text{ мм}$ Параллаксы $p_1^{(1,2)} = 4,134 \text{ мм}$ $p_2^{(1,2)} = 4,656 \text{ мм}$ $q_1^{(1,2)} = -0,01 \text{ мм}$ $q_2^{(1,2)} = 0,212 \text{ мм}$
Разности параллаксов / Parallax differences		
$\Delta p_{\text{ши}} = \Delta p_{\text{ши}} = 0$ $\Delta q_{\text{ши}} = \Delta q_{\text{ши}} = 0$	$\Delta p_1 = 0,134 \text{ мм}$ $\Delta q_1 = -0,01 \text{ мм}$ $\Delta p_2 = 0,656 \text{ мм}$ $\Delta q_2 = 0,212 \text{ мм}$	

Значения продольных и поперечных параллаксов $p_{ши}^{(1,2)}, \dots, p_{ши}^{(J-1,J)}, p_{ши}^{(J,1)}, p_i^{(1,2)}$; $q_{ши}^{(1,2)}, \dots, q_{ши}^{(J-1,J)}, q_{ши}^{(J,1)}, q_i^{(1,2)}$, где $i=\overline{1,2}$, рассчитывались по формуле (1).

В ходе экспериментальных исследований были выполнены оценки влияния отклонений БЛА на величину изменения параллаксов точек перекрываю-

щихся изображений и точности определения параметров отклонений БЛА. С этой целью в рамках первого направления исследований на наклонном снимке Р2 при значениях угловых отклонений $\nu=\omega=\tau=1^\circ; 3^\circ; 5^\circ$ были получены плоские координаты точек m_1 и m_2 и в соответствии с формулами (6) определены разности их параллаксов (табл.3).

Table 3. Оценки влияния угловых отклонений БЛА на изменения параллаксов точек перекрывающихся изображений

Table 3. Estimates of the effect of PLA angular deviations on changes in parallax points of overlapping images

Изменения параллаксов, мм / Parallax measurements, mm	Уровень угловых отклонений БЛА / The level of angular deviations of the UAV					
	$\nu = \tau = \omega$					
	1°	-1°	3°	-3°	5°	-5°
$\Delta p_1/\Delta p_2$	$\frac{0,02}{0,12}$	$\frac{-0,02}{-0,12}$	$\frac{0,08}{0,38}$	$\frac{-0,08}{-0,38}$	$\frac{0,14}{0,66}$	$\frac{-0,1}{-0,53}$
$\Delta p_{ср}$	0,07	-0,07	0,23	-0,23	0,4	-0,32
$\Delta q_1/\Delta q_2$	$\frac{0,001}{0,05}$	$\frac{-0,001}{-0,05}$	$\frac{-0,002}{0,13}$	$\frac{-0,01}{-0,13}$	$\frac{-0,01}{0,21}$	$\frac{-0,03}{-0,24}$
$\Delta q_{ср}$	0,03	-0,03	0,07	-0,07	0,1	-0,14

Анализ представленных в табл. 3 данных свидетельствует о следующем. Справедливы теоретические положения о том, что отличие от нуля разности параллаксов смежных пар снимков является достоверным показателем возникновения некоординированных отклонений БЛА от заданной траектории его горизонтального полёта. Уровень разности параллаксов зависит от величины и направления отклонений БЛА и знака ординат соответствующих точек. По-

этому следует использовать среднее по точкам значение разностей параллаксов. Модуль разности параллаксов линейно увеличивается с ростом отклонений БЛА. Эти закономерности позволяют в условиях потери сигналов от навигационных спутников осуществлять обнаружение и оценку уровня некоординированных отклонений БЛА без прямых измерений параметров полёта. По величине разностей параллаксов из выражений (6) априорно могут

быть получены эвристические оценки уровня отклонений БЛА от заданной траектории. При рассматриваемых в работе характеристиках цифровой камеры Nikon P700 и средних разностях продольных и поперечных параллаксов 39 и 13 пикселей уровень угловых и линейных отклонений составит соответственно $1,2^\circ$ и 2 м. При этом пороговый уровень разностей параллаксов может быть получен путём экстраполирования на допустимую величину отклонений. Например, если допустимая величина отклонений ограничена величиной $0,2^\circ$ и 0,2 м, то пороговый уровень разностей параллаксов составит четыре и два пикселя.

В рамках второго направления исследований были заданы следующие контрольные (истинные) значения определяемых параметров:

$$v=\omega=\tau=5^\circ; \Delta r_c=8,31 \text{ м}; \Delta r_h=8,34 \text{ м}.$$

Полученные значения угловых и линейных отклонений и оценки точно-

сти их определения при начальных приближённых значениях углов $\tilde{v}=\tilde{\omega}=\tilde{\tau}=3^\circ$, моделирующих ошибки инерциальных измерений, приведены в табл.4.

Для сравнения в табл. 5 представлены данные о точности определения параметров полёта мини БЛА средствами бортовой интегрированной навигационной системы (инерциальной и спутниковой) в штатном режиме функционирования и в автономном режиме через 5 минут после потери сигналов от спутников [16].

Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 4-5, свидетельствует о том, что разработанная методика в условиях потери сигналов от спутников обеспечивает точность определения параметров отклонений БЛА от заданной траектории, соизмеримую с точностью интегрированной навигационной системы в штатном режиме функционирования.

Таблица 4. Оценка точности определения отклонений БЛА

Table 4. Evaluation of the accuracy of determining PLA deviations

Значения линейных отклонений / Values of linear deviations		Значения угловых отклонений БЛА / Values of UAV angular deviations			Абсолютные ошибки определения отклонений БЛА / Absolute errors in determining UAV deviations				
Δr_c , м	Δr_h , м	v^* , град	ω^* , град	τ^* , град	δv , град	$\delta \omega$, град	$\delta \tau$, град	δr_c , м	$\delta \Delta r_h$, м
8,41	8,45	5,06	4,99	5,07	0,06	0,01	0,07	0,1	0,11

Таблица 5. Уровень ошибок навигации при прямолинейном горизонтальном полёте мини БЛА**Table 5.** The level of navigation errors during rectilinear horizontal flight of a mini PLA

Погрешности навигационной системы / Errors of the navigation system		
Штатный режим / Regular mode		Автономный режим / Autonomous mode
Углы тангажа и крена	0,1°	0,4°
Угол рыскания	0,2°	3,0°
Высота полёта БЛА	2 м	6м

При этом в случае необходимости может быть обеспечено автономное обнаружение, оценка уровня и определение величины параметров угловых и линейных отклонений БЛА от заданной траектории прямолинейного горизонтального полёта без прямых измерений этих параметров бортовыми средствами инерциальной и/или спутниковой навигации.

Выводы

Известные подходы к описанию зависимости параллаксов перекрывающихся изображений подстилающей поверхности от величины угловых отклонений БЛА основаны на построении сложного функционала с громоздкими тригонометрическими выражениями. Разработанная модель основана на выявленных и неизвестных ранее закономерностях связи отклонений БЛА с разностью па-

раллаксов смежных пар изображений и формализует их в явном виде в форме двух простых алгебраических уравнений. Это позволяет в два раза сократить число соответственных точек, необходимых для организации корректной математической обработки результатов измерений, существенно снизить уровень вычислительных и ресурсных затрат, и обеспечивает новое качество анализа и синтеза этих процессов.

Разработанная методика включает в себя калибровку параллаксов в штатном режиме функционирования интегрированной навигационной системы, оценку текущего уровня и расчёт величины отклонений БЛА в условиях потери сигналов от спутников по разности параллаксов смежных пар изображений, и обеспечивает уровень точности, соизмеримый с методами спутниковой навигации.

Список литературы

1. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А. А. Ардентов, И. Ю. Бесчастный, А. П. Маштаков [и др.] // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. № 3(12). С. 23-38.

2. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения / И.И. Олейник, А.А. Черноморец, В.Г. Андронов [и др]; под ред. В.Г. Андропова; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. 171 с.
3. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов / И.И. Олейник, А.А. Черноморец, В.Г. Андронов [и др]; под общ. ред. В.Г. Андропова; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. 204 с.
4. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits // Journal of applied engineering science. 2018. Vol.16. № 1. P. 107-110.
5. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. № 34(6). P. 652-661.
6. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles / L. Arulmurugan, S. Raghavendra Prabhu, M. Ilankumaran, V. Suresh, R. Saravanakumar, R., M. Raghunath // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 995(1). P. 012019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf> (дата обращения: 14.12.2021).
7. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle / S. Luo, H. Liu, M. Hu, J. Dong // Guofang Keji Daxue Xuebao. Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42. № 6. P. 1-10.
8. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. № 48(12). P. 1675-1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>.
9. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Метод автономной навигации космических аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2(65). С. 65-73.
10. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Астронавигация космических аппаратов на круговых околоземных орбитах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3(66). С. 34-44.
11. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д.А. Антонов, М.В. Жарков, И.М. Кузнецов и [др] // Труды МАИ. 2016. Вып. № 91. С. 1-26.
12. Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. М.: Академический проект, 2018. 296 с.

13. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. № 1(12). С. 129–144.

14. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия / под общей ред. А. Г. Чибуничева. М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. 292 с.

15. Раков Д.Н., Никитин В.Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъёмочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 7. С. 27-36.

16. Салычев О.С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. URL: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf (дата обращения: 14.12.2021).

References

1. Ardentov A. A., Beschastny I. Y., Mashtakov A. P. [etc.] Algoritmy vychisleniya polozheniya i orientatsii BPLA [Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software Systems: Theory and Applications*, 2012, vol. 3, no. 3(12), pp. 23-38.

2. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Andronov V.G. *Malorazmernye bespilotnye letatel'nye apparaty: zadachi obnaruzheniya i puti ikh resheniya* [Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them]; ed. by V.G. Andronov. Kursk, 2021. 171 p.

3. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Andronov V.G. *Metodologicheskie osnovy obnaruzheniya malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove kompleksnoi subpolosnoi obrabotki sverkhkorotkoimpul'snykh radiolokatsionnykh i opticheskikh signalov* [Methodological foundations for the detection of small-sized unmanned aerial vehicles based on complex sub-band processing of ultrashort pulse radar and optical signals]. Kursk, 2021. 204 p.

4. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. *Journal of applied engineering science*, 2018, vol.16, no. 1, pp. 107-110.

5. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*, 2019, no. 34(6), pp. 652-661.

6. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilankumaran M., Suresh V., Saravanakumar R., R., Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for non linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Se-*

ries: *Materials Science and Engineering*, 2020, no. 995(1), pp. 012019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/995/1/012019/pdf>. Available at: 14.12.2021).

7. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multi-modal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology*, 2020, vol. 42, no. 6, pp. 1-10.

8. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020, no. 48(12), pp. 1675-1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>.

9. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Metod avtonomnoi navigatsii kosmicheskikh apparatov [Method of autonomous navigation of spacecraft]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 2(65), pp. 65-73.

10. Andronov V.G., Emelyanov S.G. Astronavigatsiya kosmicheskikh apparatov na krugovykh okolozemnykh orbitakh [Astronavigation of spacecraft in circular near-Earth orbits]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 3(66), pp. 34-44.

11. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pronkin A.N. Opredelenie navigatsionnykh parametrov bespilotnogo letatel'nogo apparata na baze fotoizobrazheniya i inertsial'nykh izmerenii [Determination of navigation parameters of an unmanned aerial vehicle based on photographic images and inertial measurements]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2016, is. no. 91, pp. 1-26.

12. Limonov A.N., Gavrilova L.A. *Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie* [Photogrammetry and remote sensing]. Moscow, Akademicheskii proekt Publ., 2018, 296 p.

13. Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A. Opredelenie i otsenka urovnya otklonenii bespilotnykh letatel'nykh apparatov ot zadannoi traektorii po izobrazheniyam podstilayushchei poverkhnosti [Determination and Assessment of the Level of deviations of Unmanned Aerial Vehicles from a Given Trajectory from Images of the Underlying Surface]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, no. 1(12), pp. 129-144.

14. Mikhailov A. P., Chibunichev A. G. *Fotogrammetriya* [Photogrammetry]. Moscow, 2016. 292 p.

15. Rakov D.N., Nikitin V.N. Vybór tsifrovogo nemetricheskogo fotoapparata dlya bespilotnogo aerofotos"emochnogo kompleksa [The choice of a digital non-metric camera for

an unmanned aerial photography complex]. *Interexpo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2012, no. 7, pp. 27-36.

16. Salychov O.S. *Avtopilot BPLA s inertsiial'noi integrirovannoi sistemoi – osnova bezopasnoi ekspluatatsii bespilotnykh kompleksov* [UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes]. Available at: http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychov_2602182965.pdf (accessed: 14.12.2021).

Информация об авторах / Information about the Authors

Андронов Владимир Германович, доктор технических наук, заведующий кафедрой Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladia58@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2578-0026>

Vladimir G. Andronov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladia58@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2578-0026>

Чуев Андрей Алексеевич, преподаватель кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2980-0533>

Andrey A. Chuev, Lecturer, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kpiss-swsu@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2980-0533>

Юдин Илья Сергеевич, студент кафедры конституционного права, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: angry_bender@mail.ru

Ilya S. Yudin, student, Constitutional Law Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: angry_bender@mail.ru

Метод ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в программно-конфигурируемых сетях

К. И. Никишин¹ ✉

¹ Пензенский государственный университет
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

✉ e-mail: nkipnz@mail.ru

Резюме

Цель исследования: разработка метода ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в программно-конфигурируемых сетях (ПКС).

Методы. Приведен обзор и описание передачи разнородного трафика в коммутаторе Ethernet с поддержкой качества обслуживания и технологии Time-Triggered Ethernet. Детально описано функционирование блоков контроля таймаутов на мгновенное удаление кадра из ПКС *hard timeout* и в зависимости от длины кадра при достижении приемной стороны *idle timeout*. Данные блоки управления включены в состав аппаратного защитника контроля таймаутов для трафика реального времени. Описана работа коммутатора OpenFlow с учетом защитника контроля таймаутов. Описано и разработано формирование временных окон таймаутов при передаче кадра.

Результаты. С помощью предложенного метода ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС было проведено моделирование ПКС на основе сетей Петри и пакета моделирования CPN Tools. Полученная модель и результаты экспериментов согласуются с теоретическими расчетами и предложенным методом передачи трафика реального времени с учетом его потерь в ПКС.

Заключение. С помощью модели было исследовано функциональное и временное поведение модели, проведена верификация метода с использованием сетей Петри. Были получены результаты в виде временных диаграмм, отражающих работу по типам трафика в соответствии с предложенным методом.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети; коммутатор; Ethernet; OpenFlow; трафик реального времени; контроль потерь; таймаут; сети Петри; CPN Tools.

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

Для цитирования: Никишин К. И. Метод ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в программно-конфигурируемых сетях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 142-158. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-142-158>.

Поступила в редакцию 18.06.2022

Подписана в печать 04.07.2022

Опубликована 29.07.2022

Method for Early Diagnosis of Real-Time Traffic Loss with Timeout Monitoring in Software-Configurable Networks

Kirill I. Nikishin ¹ ✉

¹ Penza State University

40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: nkipnz@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop the method for early diagnosis of real-time traffic loss with time-out control in software defined networks (SDN).

Methods. An overview and description of the transfer of heterogeneous traffic in an Ethernet switch with support for quality of service and Time-Triggered Ethernet technology is given. The functioning of the timeout control blocks for instantaneous removal of a frame from the hard timeout control system and depending on the length of the frame when the idle timeout receiving side is reached is described in detail. These control units are included in the hardware guard of control time-outs for real-time traffic. The work of the switch OpenFlow is described using guard of control time-outs. The formation of time windows of timeouts during frame transmission is described and developed.

Results. With the help of the proposed method of early diagnosis of real-time traffic losses with control of timeouts in SDN, a modeling of SDN based on Petri nets and using the CPN Tools modeling package was carried out. The obtained model and experimental results are consistent with the theoretical calculations and the proposed method of transmitting real-time traffic, taking into account its losses in SDN.

Conclusion. Using the model, the functional and temporal behavior of the model was investigated; the method was verified using Petri nets. The results were obtained in the form of time diagrams reflecting the work on traffic types in accordance with the proposed method.

Keywords: software-configurable networks; switch; Ethernet; OpenFlow; Real-time traffic loss control; timeout; Petri nets; CPN Tools.

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

For citation: Nikishin K. I. Method for Early Diagnosis of Real-Time Traffic Loss with Timeout Monitoring in Software-Configurable Networks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 142-158 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-142-158>.

Received 18.06.2022

Accepted 04.07.2022

Published 29.07.2022

Введение

Современные сетевые компьютерные парадигмы основаны на технологии Ethernet, которая позволяет передавать различный трафик по сети. Со временем усложнения алгоритмов и об-

работки трафика было введено «качество обслуживания» в Ethernet [1-3].

«Качество обслуживания» базируется на стандарте IEEE 802.1 [4], который маркирует и классифицирует трафик по приоритетам, чем выше приоритет, тем быстрее обрабатывается дан-

ный вид трафика. Максимальным приоритетом обладает трафик реального времени, для которого критична задержка кадров в сети и джиттер (отклонение от средней задержки кадра) [2]. Таким образом, в различных сетевых технологиях задержка для трафика реального времени может достигать одной микросекунды.

Современные требования, предъявляемые к обработке трафика, должны обладать свойствами мобильности, быстроты, упрощения администрирования сетевого оборудования. Все эти требования послужили к появлению ПКС [5-6].

В ПКС сетях выделяют 3 уровня: уровни приложений, управления и инфраструктурный. Основным элементом является контроллер, ведущий обработку трафика и рассчитывающий оптимальные маршруты для передачи трафика в коммутаторы. Обмен трафика производится через протокол OpenFlow [7-9].

В ПКС управление и настройка происходит над потоками данных, совокупностью набора кадров [10-12]. Входящий кадр поступает в коммутатор, работающий по протоколу OpenFlow, где ищется соответствие набора полей кадра в одной из таблиц потоков. Таблица потоков состоит из следующих полей: полей стандарта IEEE 802.1, приоритет, счетчики, инструкции, таймауты.

С помощью инструкций осуществляется дальнейшая обработка кадра в сети: передача в выходной порт, очередь коммутатора, удаление кадра, передача кадра в следующую таблицу по-

токов. Таймауты бывают двух видов: idle timeout – удалить запись в таблице и пакет, если он не достигнет приемной стороны и hard timeout – удалить принудительно запись в таблице и кадр, когда будет достигнуто заданное время.

Физически таблица потоков представляется сложным устройством в ПКС, поскольку содержит большое количество определенных полей и ведет статистику входящих, переданных и ошибочных кадров. К одному из недостатков ПКС можно отнести недостаточное снижение задержки трафика реального времени в сети, как, к примеру, по Time-Triggered Ethernet (TTE), позволяющей передавать трафик жесткого реального времени с точностью до 1 микросекунды.

В статье уделяется внимание передаче трафика реального времени в ПКС, поскольку важна передача с минимальной задержкой и минимальной потерей таких кадров в сети.

Материалы и методы

Согласно технологии TTE контроль трафика жесткого реального времени осуществляет аппаратный защитник. Физически защитник кадров находится на входе коммутатора Ethernet. Защитников может быть несколько в сети на случай возникновения ошибок в сети или сбоев в работе одного из защитников. На рис. 1 изображена сеть по TTE.

Защитник формирует на определенное время временное окно (тайм слот) для передачи трафика реального

времени. Учитывается непосредственно время передачи такого кадра до момента прихода к защитнику и ограничение максимальной задержки, которая допустима для такого кадра. В случае если кадр реального времени не проходит в отведенное временное окно, такой кадр удаляется из сети и заново отправляется в коммутатор Ethernet.

В статьях [13-15] было проведено моделирование коммутатора по TTE с качеством обслуживания и предложен новый метод передачи на основе сетей Петри. Для исследования компьютерных сетей подходит пакет CPN Tools, который позволяет исследовать сети с функциональной, временной точек зрения, а также верифицировать разработанные модели.

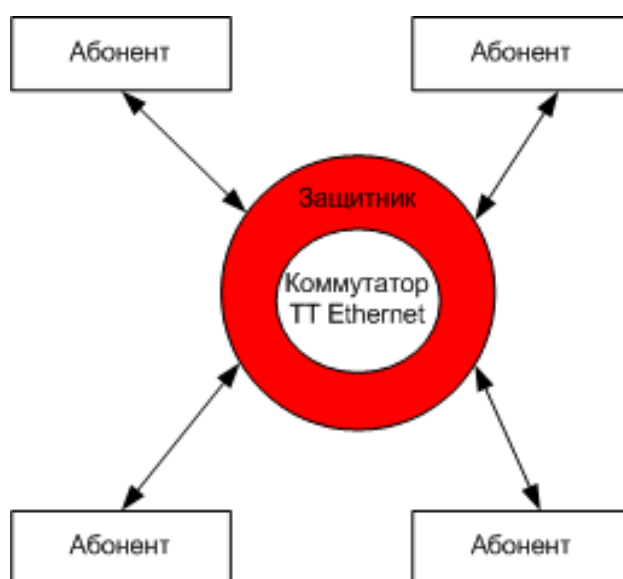


Рис. 1. Структура компьютерной сети по TTE

Fig. 1. Computer network structure by TTE

Возвращаясь к ПКС, контроллер и вся сеть реагирует на возможный случай потери трафика реального времени слишком поздно. Для передачи кадра от контроллера к коммутатору OpenFlow затрачивается некоторое время обработки, поскольку кадр передается не мгновенно. Кроме этого, кадр сравнивается в таблицах потоков на некоторое соответствие перечню полей, если кадр не находится в одной таблице потоков происходит переход к следующей и так

далее. Если кадр не находится и в последней таблице потоков, только в этом случае происходит удаление кадра из ПКС и обновление таблиц потоков.

Как можно увидеть из описанного выше алгоритма протокол OpenFlow затрачивает значительное время для поиска кадра в таблицах потоков и сообщает контроллеру об удалении кадра слишком поздно, пока не пройдет поиск по всем таблицам потоков, в случае его несоответствия по полям. Кроме этого

таблица потоков слишком громоздкая, можно было бы достичь упрощения таблицы за счет вынесения контроля таймаутов на входе коммутатора OpenFlow.

Предлагается метод ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС. На входящий порт вводится специальный защитник по контролю таймаутов, не много схожий по технологии TTE. Специальный защитник контролируется только трафик реального времени, обычный трафик осуществляет передачи и управление также стандартным образом по протоколу OpenFlow.

Защитник состоит из нескольких блоков контроля таймаутов: контроль на мгновенное удаление кадра из ПКС hard timeout и контроль в зависимости

от длины кадра достижения приемной стороны idle timeout. Аппаратный защитник контроля таймаутов представлен на рис. 2.

Таким образом, на вход коммутатора по протоколу OpenFlow добавляется аппаратный защитник таймаутов (рис. 3), защитников может быть несколько для избегания ошибок в ПКС.

Вначале производится анализ типа трафика – реального времени или обычный, если трафик реального времени поступает на вход защитника контроля таймаутов и проверку успешного прохождения кадра к коммутатору, в случае неуспешной передачи сообщение контроллеру ПКС на ранней стадии передачи кадра, чем стандартным методом по таблице потоков.

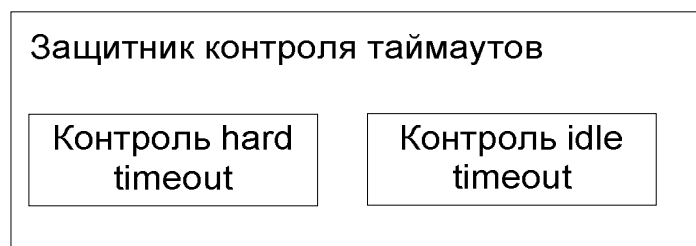


Рис. 2. Аппаратный защитник контроля передачи трафика реального времени с учетом таймаутов

Fig. 2. Hardware guard for controlling the transmission of real-time traffic and using timeouts

Обычный трафик поступает на левую таблицу потоков и далее по алгоритму протокола OpenFlow [16-18]. После проверки на успешную передачу кадр реального времени отправляется также в таблицы потоков для определения маршрута в ПКС.

Блок исполнить набор команд выполняет обработку кадра для передачи в выходной порт, направить в очередь

кадр, удалить кадр и сообщить контроллеру. Если кадр реального времени не успевает передаться за время, заложенное в проверках таймаутов, то вырабатывается команда для информирования контроллера на повторную передачу кадра на ранней стадии. В остальных случаях в случае несоответствия кадра любого типа трафика во всех таблицах потоков, также такой кадр удаля-

ется из ПКС с информированием команды контроллера.

Моменты прибытия кадров реального времени контролируются в соответствии с временным окном *hard timeout* (рис.4).

$T_{tr} + T_{latency} < Th_{time}$, где T_{tr} – время передачи от контроллера, $T_{latency}$ – задержка самой передачи на линиях, Th_{time} – время *hard timeout*.

Время начала $Th_{time_beg} = T_{sys} + T_{latency}$, где T_{sys} – время в системе коммутатора.

Время окончания $Th_{time_end} = Th_{time_beg} + T_{delta}$, где T_{delta} – время настройки таймаута.

Формирование времени начала и окончания окна контроля таймаута представлено на рис. 5.

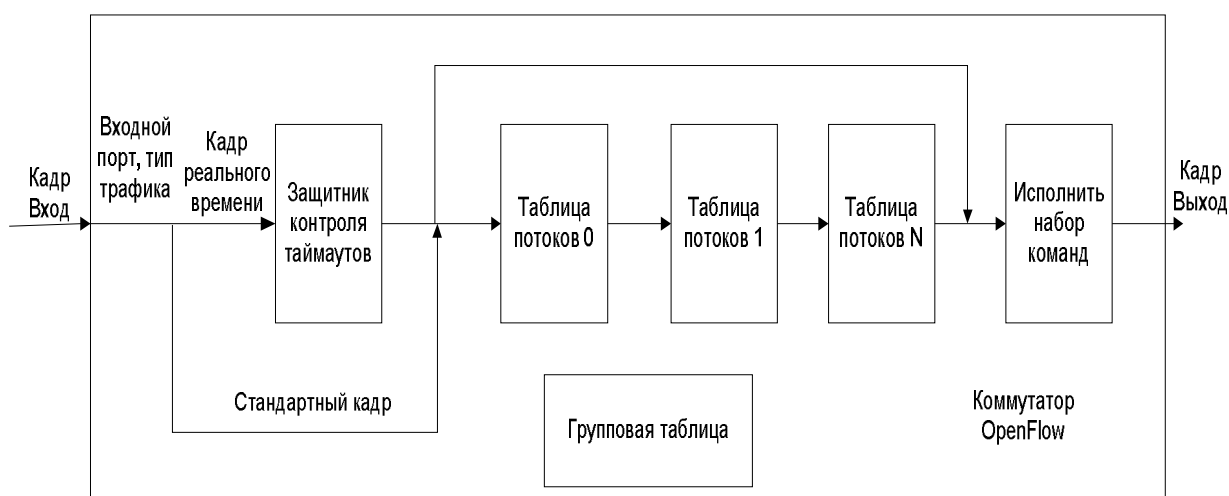


Рис. 3. Коммутатор OpenFlow с учетом защитника контроля таймаутов

Fig. 3. Switch OpenFlow switch using guard of control the timeout

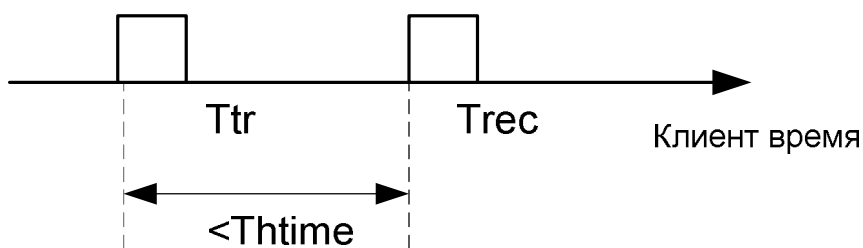


Рис. 4. Временное окно контроля таймаута *hard timeout*

Fig. 4. Temporal window of control timeout *hard timeout*

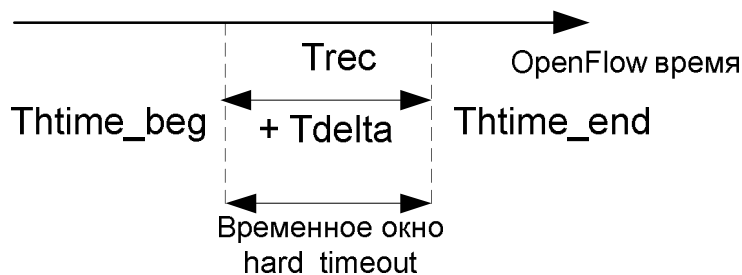


Рис. 5. Время начала и окончания окна контроля таймаута hard timeout

Fig. 5. The begin and end time of window of control the timeout hard timeout

После прохождения контроля таймаута hard timeout кадр реального времени отправляется на проверку контроля таймаута idle timeout. Моменты прибытия кадров реального времени контролируются в соответствии с новым временным окном idle timeout (рис.6).

$Ttr + Tlatency < Titime$, где $Titime$ – время idle timeout.

Время начала $Titime_beg = Tsys + Tlatency$.

Время окончания $Titime_end = Titime_beg + Tdelta + Tsize$, где $Tsize$ – время возможности передачи кадра реального времени в зависимости от его длины.

Формирование времени начала и окончания окна контроля таймаута представлено на рис. 7.

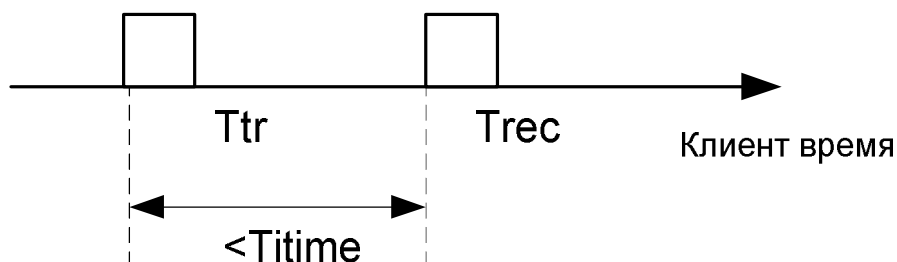


Рис. 6. Временное окно контроля таймаута idle timeout

Fig. 6. Temporal window of control timeout idle timeout

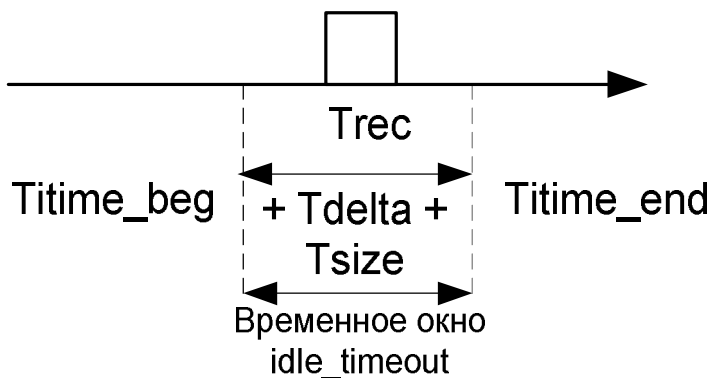


Рис. 7. Время начала и окончания окна контроля таймаута idle timeout

Fig. 7. The begin and end time of window of control the timeout idle timeout

Методы передачи трафика реального времени

В компьютерных сетях на основе Ethernet основным методом передачи разнородного трафика, в том числе трафика реального времени, является передача трафика на основе классификации приоритетов в буфере коммутатора. Приоритет трафика формируется в формате кадра согласно QoS и стандарту IEEE 802.1. Недостаток метода – невозможно определить на раннем этапе потерю трафика реального времени, кроме как на этапе передачи в выходной порт, может достигаться значительная задержка передачи и джиттер, зависящие от алгоритмов диспетчеризации в коммутаторе.

Компьютерные сети, использующие технологию TTE и данный метод передачи, обладают достаточно большим быстродействием передачи разнородного трафика, сеть содержит отказоустойчивые узлы, защиту от ошибок, контроль учета временных параметров трафика. Недостаток метода – использование только для таких сетей, где время принятия решения по передаче трафика реального времени и его маршрута достигается задержкой до 1 микросекунды, что не подходит для использования его в ПКС, поскольку транспортные затраты на принятие решения контроллером и администратором сети будут больше отведенного времени.

Метод передачи разнородного трафика в ПКС основывается на протоколе OpenFlow. К недостаткам передачи трафика в ПКС можно отнести следу-

ющее: таблицы потоков являются сложными устройствами, что требует в свою очередь больших аппаратных затрат на хранение и учет данных, таймаутов и статистики потоков; не достаточное снижение задержки для трафика реального времени, как в методе TTE; отсутствие контроля потери кадров (потоков) трафика реального времени на раннем этапе, а только при прохождении n количества по таблицам потоков; отсутствие аппаратного устройства на входе коммутатора, работающего по протоколу OpenFlow, который может сообщать контроллеру ПКС о необходимости повторной передачи трафика реального времени на раннем этапе.

Отличительные особенности предложенного метода ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС от описанных выше методов в компьютерных сетях:

- упрощаются таблицы потоков в OpenFlow для трафика реального времени за счет контроля и хранения таймаутов в своей структуре и повышение быстродействия анализа передачи кадра за счет снятия контроля таймаутов;

- осуществляется определение типа трафика на входе ПКС для дальнейшей передачи;

- для трафика реального времени осуществляется контроль на мгновенное удаление кадра из ПКС *hard timeout* за счет прибытия кадра в строго отведенное временное окно таймаута. В случае если момент прихода кадр не укладывается в отведенное окно *hard timeout*, кадр удаляется из ПКС и через

набор инструкций протокола OpenFlow сообщается контроллеру ПКС;

– после успешного контроля на hard timeout осуществляется дальнейший контроль в зависимости от длины кадра достижения приемной стороны idle timeout в строго отведенное временное окно таймаута. В случае если момент прихода кадр не укладывается в отведенное окно idle timeout, кадр удаляется из ПКС и через набор инструкций протокола OpenFlow сообщается контроллеру ПКС;

– предложен аппаратный защитник по совмещению функций контроля данных таймаутов и состоящий из блоков управления hard timeout и idle timeout, работающий по описанному выше алгоритму.

На рис. 8 представлен алгоритм метода ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС.

Результаты и их обсуждение

С помощью предложенного метода ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС было проведено моделирование компьютерной сети. Для этих целей был выбран математический аппарат сетей Петри, были выбраны цветные временные иерархические сети Петри, а в качестве инструмента построение таких сетей Петри пакет CPN Tools. Данный пакет хорошо зарекомендовал себя в части исследования телекоммуникационных и компьютерных сетей, их алгоритмов, протоколов, различного обслуживания [1-3, 19-20].

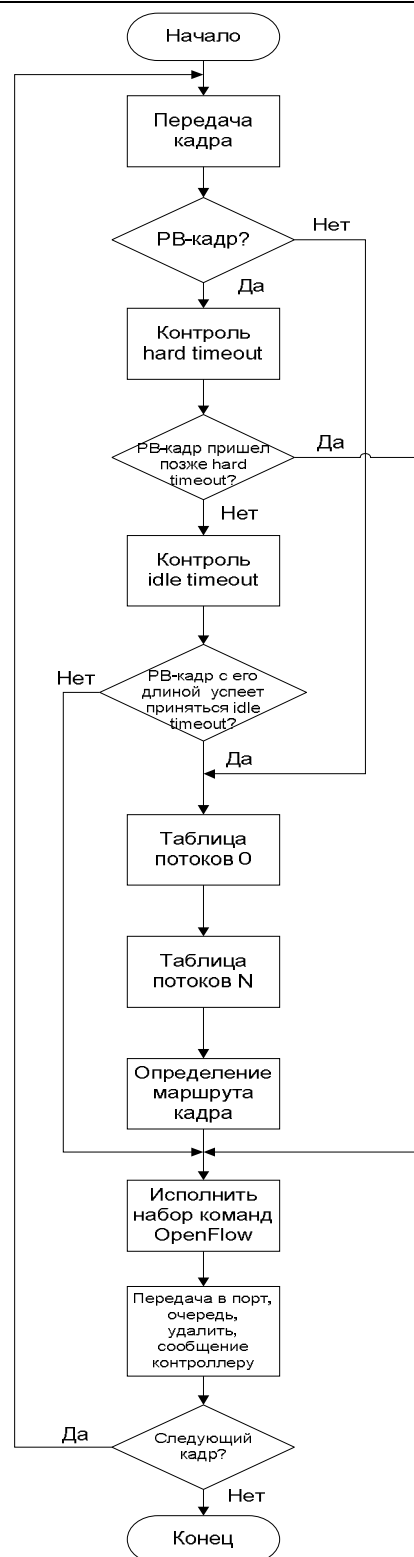


Рис. 8. Алгоритм предложенного метода с контролем таймаутов в ПКС

Fig. 8. The algorithm of the proposed method with the control of timeouts in SDN

На рис. 9 показана сеть Петри одного из главного компонента предложенного метода контроля hard timeout. Выполняется контроль времени прибытия трафика реального времени с вре-

менным окном контроля hard timeout. Подробное описание модели предложенного метода, алгоритмы функционирования на сетях будут рассмотрены в дальнейших статьях и исследованиях.

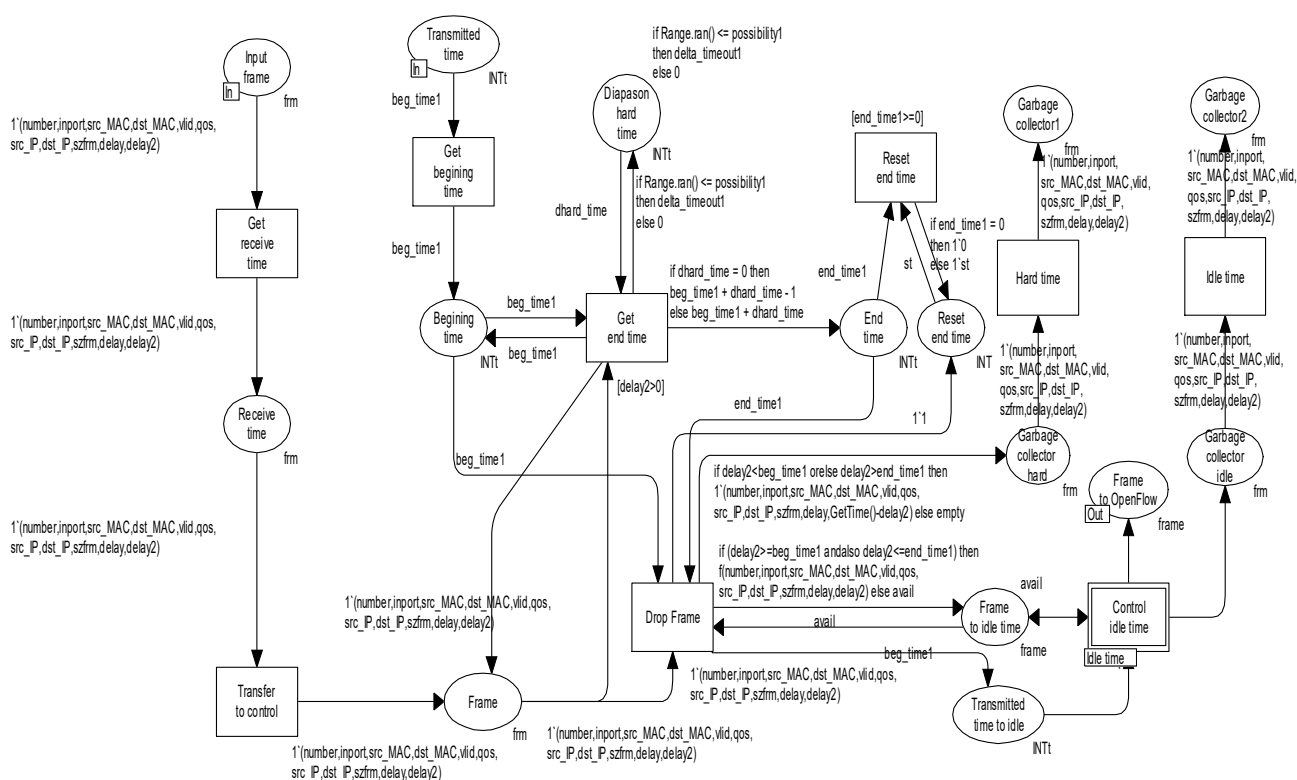


Рис. 9. Сеть Петри контроля hard timeout

Fig. 9. Petri nets of control hard timeout

Модель позволила исследовать предложенный метод, как на функциональное, так и на временное поведение модели, провести верификацию метода с использованием сетей Петри.

Профиль исследуемого трафика представлен на рис. 10, где показано распределение трафика реального времени (регулярный трафик) и стохастический трафик, который распределяется в диапазоне от 512 бит до 12 000 бит. Более подробное описание работы и исследо-

вание трафика для других методов и алгоритмов коммутаторов Ethernet описано в статье 19.

На рис. 11 представлено сравнение предложенного метода с классическим методом передачи потоков (кадров) в ПКС через коммутатор OpenFlow. Как видно из рис. 11 было проведено сравнение моделей на сетях Петри и показано, что задержка уменьшается.

Контроллер ПКС за счет ранней диагностики потери трафика реального

времени позволяет быстрее передать данные по сети, чем пока пройдет полное сравнение по всем таблицам потоков коммутатора OpenFlow, тем самым снижается задержка для трафика реального времени.

На рис. 12 представлены временные диаграммы, показывающие работу по типам трафика предложенного метода.

На рис. 12 передается разнородный трафик: РВ – трафик реального времени и ЭТ – обычный (эластичный) трафик. В случае неуспешного прохождения кадра через этап 1 на проверку hard timeout уже через время t_1 сообщается контроллеру ПКС о повторной переда-

че, на проверке hard timeout сразу же через время t_2 . Стандартным методом передачи трафика в ПКС и контроль потерь РВ-трафика может происходить минимум только через время t_3 при сравнении с правилами в таблице потоков 0, а максимальном варианте только через время $N \cdot t_4$, пока не произойдет сравнение со всеми таблицами потоков N и только после этого сообщение об удалении РВ-кадра контроллеру ПКС.

Полученная модель и результаты экспериментов согласуются с теоретическими расчетами и предложенным методом передачи трафика реального времени с учетом его потерь в ПКС.

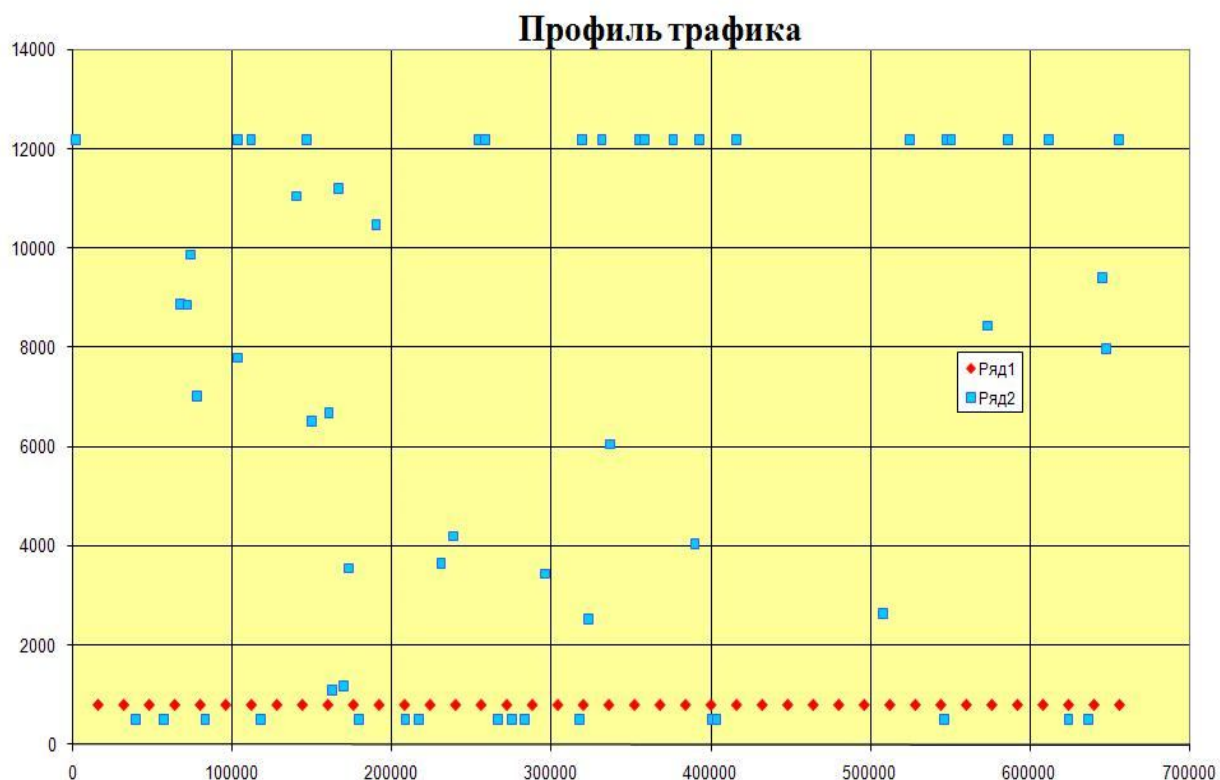


Рис. 10. Профиль трафика

Fig. 10. Profile of traffic

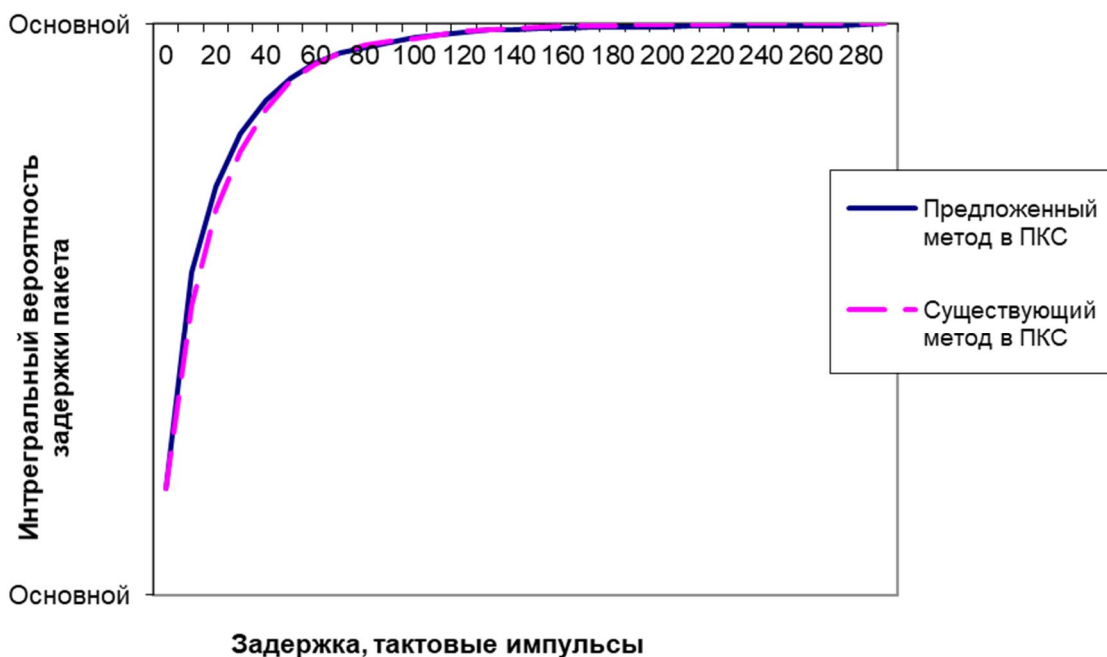


Рис. 11. Задержка передачи трафика двумя методами ПКС

Fig. 11. Delay of traffic transmission with two methods SDN

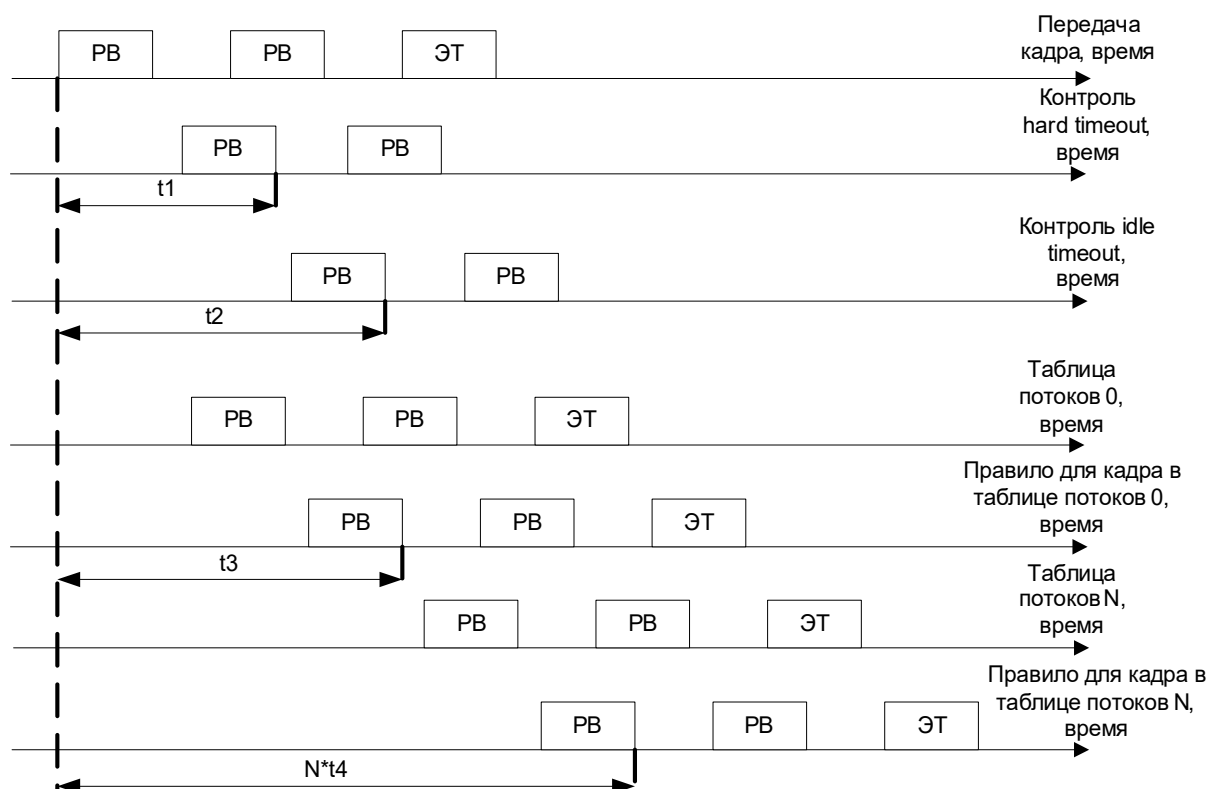


Рис. 12. Временные диаграммы работы модели предложенного метода с контролем таймаутов в ПКС

Fig. 12. Time diagrams of the work of model using the proposed method with the control of timeouts in SDN

Выводы

Предложен метод ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС и разработан алгоритм его работы. Детально описано функционирование блоков контроля таймаутов на мгновенное удаление кадра из ПКС *hard timeout* и в зависимости от длины кадра при достижении приемной стороны *idle timeout*.

Данные блоки управления включены в состав аппаратного защитника контроля таймаутов для трафика реального времени. Описана работа коммутатор OpenFlow с учетом защитника

контроля таймаутов. Описано и разработано формирование временных окон таймаутов при передаче кадра.

С помощью предложенного метода ранней диагностики потерь трафика реального времени с контролем таймаутов в ПКС было проведено моделирование ПКС на основе сетей Петри.

Было исследовано функциональное и временное поведение модели, проведена верификация метода с использованием сетей Петри. Были получены результаты в виде временных диаграмм, отражающих работу по типам трафика в соответствии с предложенным методом.

Список литературы

1. Никишин К. И. Механизм управления трафиком реального времени в коммутаторе Ethernet // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 10. С. 32–37.
2. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames / E. Kizilov, N. Konnov, K. Nikishin, D. Pashchenko, D. Trokoz // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 44. P. 01011-p.1–01011-p. 5.
3. Артемов И. В., Коннов М. Н., Никишин К. И. Анализ эффективности адаптивного алгоритма формирования виртуального таймслота в сетевом коммутаторе // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. Т.2. С. 298–302.
4. Описание стандарта IEEE 802.1q [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (дата обращения 01.06.2022).
5. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.
6. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments, Computer Networks. 2014. Vol. 61. P. 151–175.
7. Корячко В. П., Перепелкин Д. А. Программно-конфигурируемые сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 288 с.

8. Shalimov A. et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers // Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM, 2013.
9. Перепелкин Д. А. Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 8. С. 602–610.
10. Перепелкин Д. А., Бышов В. С. Балансировка потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества обслуживания сетевых сервисов // Радиотехника. 2016. № 11. С. 111–119.
11. Никульчев Е. В., Паяин С. В., Плужник Е. В. Динамическое управление трафиком программно-конфигурируемых сетей в облачной инфраструктуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (45). С. 54–57.
12. Леохин Ю. Л., Фатхулин Т. Д. Оценка возможности предоставления гарантированной скорости передачи данных в программно-конфигурируемой оптической сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 45–59. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-71-45-59>.
13. Nikishin K., Konnov N. Schedule Time-Triggered Ethernet // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
14. Никишин К. И., Коннов Н. Н., Пащенко Д. В. Моделирование систем на базе технологии Time-Triggered Ethernet // Информационные технологии и математическое моделирование: материалы XV Междунар. конф. имени А. Ф. Терпугова. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2016. Ч. 2. С. 117–122.
15. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet // Springer Information Technologies and Mathematical Modelling – Queueing Theory and Applications. 2017. Vol. 638 of the series Communications in Computer and Information Science. P. 303–314.
16. Karakus M., Durresi A. Quality of service (QoS) in software defined networking (SDN): A survey // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 80. P. 200–218.
17. Ren H., Li X., Geng J. A SDN-based dynamic traffic scheduling algorithm, in IEEE International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Chengdu, China, 2016. <https://doi.org/10.1109/CyberC.2016.103>.
18. Maniu R., Dumitru L. A. Exploring the possibilities of a self-regulating SDN controller // Scientific Bulletin «Mircea cel Batran» Naval Academy. 2015. Vol. 18. No. 1. P. 58–61.

19. Никишин К. И., Коннов Н. Н. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 1 (17). С. 299–307.

20. Аладьев Ю. Ю., Никишин К. И. Моделирование сетевого трафика в пакете CPN Tools // Новые информационные технологии и системы: сб. науч. тр. XIV Международ. науч.-техн. конф. Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. С. 128–132.

References

1. Nikishin K. I. Mekhanizm upravleniya trafikom real'nogo vremeni v kommutatore Ethernet [The mechanism of management real-time traffic in the switch Ethernet]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 10, pp. 32–37.

2. Kizilov E., Konnov N., Nikishin K., Pashchenko D., Trokoz D. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 44, pp. 01011-p.1–01011-p. 5.

3. Artemov I. V., Konnov M. N., Nikishin K. I. Analiz effektivnosti adaptivnogo algoritma formirovaniya virtual'nogo taimslot v setevom kommutatore [Analysis of the effectiveness of an adaptive algorithm for forming a virtual timeslot in a network switch]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"]. Penza, 2020, vol.2, pp. 298-302.

4. *Opisanie standart IEEE 802.1q* [Description of the IEEE 802.1q standard]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (accessed 01.06.2022).

5. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. Openflow: enabling innovation in campus networks, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.

6. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Rijendam J., McKeown N. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments, *Computer Networks*, 2014, vol. 61, pp. 151–175.

7. Koryachko V. P., Perepelkin D. A. *Programmno-konfiguriruemye seti* [Software defined networks]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2020. 288 p.

8. Shalimov A. et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers. Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM, 2013.

9. Perepelkin D. A. Kontseptual'nyi podkhod dinamicheskogo formirovaniya trafika programmno-konfiguriruemykh telekommunikatsionnykh setei s balansirovkoj nagruzki [Conceptual approach of dynamic traffic generation of software defined telecommunication networks with load balancing]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*, 2015. vol. 21, no. 8, pp. 602-610.

10. Perepelkin D. A., Byshov V. S. Balansirovka potokov dannykh v programmno-konfiguriruemyykh setyakh s obespecheniem kachestva obsluzhivaniya setevykh ser-visov [Balancing data flows in software defined networks with ensuring the quality of service of network services]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*, 2016, no. 11, pp. 111-119.
11. Nikulchev E. V., Payin S. V., Pluzhnik E. V. Dinamicheskoe upravlenie trafikom programmno-konfiguriruemyykh setei v oblachnoi infrastrukture [Dynamic traffic management of software defined networks in cloud infrastructure]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2013, no. 3 (45), pp. 54-57.
12. Leokhin Yu. L., Fathulin T. D. Otsenka vozmozhnosti predostavleniya garantirovannoi skorosti peredachi dannykh v programmno-konfiguriruemoi opticheskoi seti [Evaluation of the possibility of providing a guaranteed data transfer rate in a software defined optical network]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2020, no. 71, pp. 45-59. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-71-45-59>.
13. Nikishin K., Konnov N. Schedule Time-Triggered Ethernet. International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
14. Nikishin K. I., Konov N. N., Pashchenko D. V. Modelirovanie sistem na baze tekhnologii Time-Triggered Ethernet [Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet]. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie: materialy XV Mezhdunar. konf. imeni A. F. Terpugova* [Information technologies and mathematical modeling: materials of the XV International Conf. named after A. F. Terpugov]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2016, part 2. pp. 117-122. (In Russ.)
15. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet. Springer Information Technologies and Mathematical Modelling – Queueing Theory and Applications, 2017, vol. 638 of the series Communications in Computer and Information Science, pp. 303–314.
16. Karakus M., Durresi A. Quality of service (QoS) in software defined networking (SDN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, vol. 80, pp. 200-218.
17. Ren H., Li X., Geng J. A SDN-based dynamic traffic scheduling algorithm, in IEEE International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Chengdu, China, 2016. <https://doi.org/10.1109/CyberC.2016.103>.
18. Maniu R. and Dumitru L. A. Exploring the possibilities of a self-regulating SDN controller. *Scientific Bulletin «Mircea cel Batran» Naval Academy*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 58-61.

19. Nikishin K. I., Konnov N. N. Generator trafika Ethernet na osnove tsvetnykh setei Petri [The traffic generator of switch Ethernet using colored Petri nets]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2016, no. 1 (17), pp. 299–307.

20. Aladyev Yu. Yu., Nikishin K. I. Modelirovanie setevogo trafika v pakete CPN Tools [Modeling of network traffic in the CPN Tools package]. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: sb. nauch. tr. KhIV Mezh-dunar. nauch.-tekhn. konf.* [New information technologies and systems. Collection of scientific articles of XIV International scientific-technical. conf.]. Penza, PSU Publ., 2017, pp. 128-132.

Информация об авторе / Information about the Author

Никишин Кирилл Игоревич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: nkipnz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7966-7833>

Kirill I. Nikishin, Cand. of Sci. (Engineering),, Senior Lecturer of of Computer Engineering Department, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: nkipnz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7966-7833>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-159-171>

Увеличение производительности языковых моделей «трансформер» в информационных вопросно-ответных системах

Д. Т. Галеев ¹✉, В. С. Панищев ¹, Д. В. Титов ¹

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

✉ e-mail: ra3vww@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является увеличение производительности вопросно-ответных информационных систем на русском языке. Научная новизна работы состоит в увеличении производительности для модели RuBERT, которая была обучена для нахождения ответа на вопрос в тексте. Поскольку более производительная языковая модель позволяет обрабатывать большее количество запросов за то же самое время, результаты работы могут найти применение в различных информационных вопросно-ответных системах, для которых важна скорость отклика.

Методы. В настоящей работе используются методы обработки естественного языка, машинного обучения, уменьшения размера искусственных нейронных сетей. Языковая модель была настроена и обучена при помощи библиотек машинного обучения Torch и Onnxruntime. Оригинальная модель и набор данных для обучения были взяты в библиотеке Huggingface.

Результаты. В результате исследования была увеличена производительность работы языковой модели RuBERT при помощи методов уменьшения размера нейронных сетей, таких как дистилляция знаний и квантизация, а также при помощи экспорта модели в формат ONNX и её запуска в среде выполнения ONNX.

Заключение. В результате, модель, к которой одновременно были применены дистилляция знаний, квантизация и ONNX оптимизация, получила увеличение производительности в ~4.6 раза (с 66.57 до 404.46 запросов в минуту), при этом размер модели уменьшился в ~13 раз (с 676.29 Мб до 51.66 Мб). Обратной стороной полученной производительности стало ухудшение показателей EM (с 61.3 до 56.87) и F-мера (с 81.66 до 76.97).

Ключевые слова: машинное обучение; глубокое обучение; нейронные сети; обработка естественного языка; трансформер.

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

Для цитирования: Галеев Д. Т., Панищев В. С., Титов Д. В. Увеличение производительности языковых моделей «трансформер» в информационных вопросно-ответных системах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 159-171. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-159-171>.

Поступила в редакцию 19.05.2022

Подписана в печать 05.07.2022

Опубликована 29.07.2022

Increased Performance of Transformers Language Models in Information Question and Response Systems

Denis T. Galeev ¹ ✉, Vladimir S. Panishchev ¹, Dmitry V. Titov ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ra3www@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this work is to increase the performance of question and response information systems in Russian. Scientific novelty of the work is to increase the performance for RuBERT model, which was trained to find the answer to the question in the text. As far as a more efficient language model allows more requests to be processed in the same time, the results of this work can be used in various information question and response systems for which response speed is important.

Methods. The present work uses methods of processing natural language, machine learning, reducing the size of artificial neural networks. The language model was configured and trained using Torch and Onnxruntime machine learning libraries. The original model and training dataset were taken from the Huggingface Library.

Results. As a result of the study, the performance of RuBERT language model was increased using methods to reduce the size of neural networks, such as distillation of knowledge and quantization, as well as by exporting the model to ONNX format and running it in ONNX runtime.

Conclusion. As a result, the model, to which knowledge distillation, quantization and ONNX optimization were simultaneously applied, received a performance increase of ~ 4.6 times (from 66.57 to 404.46 requests per minute), while the size of the model decreased ~ 13 times (from 676.29 MB to 51.66 MB). The downside of obtained performance was EM deterioration (from 61.3 to 56.87) and F-measure (from 81.66 to 76.97).

Keywords: machine learning; deep learning; neural networks; natural language processing; transformer.

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

For citation: Galeev D. T., Panishchev V. S., Titov D. V. Increased Performance of Transformers Language Models in Information Question and Response Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 159-171 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-159-171>.

Received 19.05.2022

Accepted 05.07.2022

Published 29.07.2022

Введение

Появление большого количества онлайн сервисов способствовало бурному росту команд для поддержки пользователей данных сервисов. Поддержка пользователей обычно представлена в виде чата на сайте сервиса, в котором пользователи могут задавать появившиеся у них вопросы или обсуждать проблемы, ко-

торые возникли у них во время взаимодействия с сервисом. Часто в этих чатах пользователи общаются непосредственно с людьми, которые были наняты для помощи пользователям. Однако сейчас можно заметить, как множество компаний работают над внедрением искусственного интеллекта во взаимодей-

ствие с клиентами [1], а также над размещением реальных людей в службе поддержки на различные модели машинного обучения [1]. Поскольку данные модели должны уметь находить нужную для пользователей информацию в различных базах знаний, то одной из важных задач в обработке естественного языка является задача нахождения ответа на вопрос в тексте.

Под поиском ответа на вопрос в тексте будем подразумевать наличие текста и вопроса к тексту, а также того, что система должна выбрать в качестве ответа на вопрос непрерывный фрагмент из данного текста. В англоязычной литературе данный тип задачи называется «Извлечение ответа на вопрос» (Extractive question answering). Для моделей, которые используют только кодировщик, задача сводится к тому, что необходимо ответить на два вопроса для каждого слова в тексте: «Является ли данное слово из текста началом ответа на заданный вопрос?», «Является ли данное слово из текста концом ответа на заданный вопрос?»:

$$-\sum_k (\log p_{\text{start}}(y_k^{\text{start}} | C, Q; \Theta, w_{\text{start}}) + \log p_{\text{end}}(y_k^{\text{end}} | C, Q; \Theta, w_{\text{end}})),$$

где y_k^{start} и y_k^{end} – позиции начала и конца ответа на вопрос для примера с индексом k , C – текст, Q – вопрос, Θ – параметры языковой модели, w_{start} и w_{end} – обучаемые параметры для предсказания позиции начала и конца ответа на вопрос. Вероятности p_{start} и p_{end} при ис-

пользовании модели BERT определяются следующим образом:

$$p^{\text{start}}(y) = \text{softmax}(\left[\{w_{\text{start}}, \text{BERT}_0^N\}, \{w_{\text{start}}, \text{BERT}_1^N\}, \dots, \{w_{\text{start}}, \text{BERT}_L^N\} \right]),$$

$$p^{\text{end}}(y) = \text{softmax}(\left[\{w_{\text{end}}, \text{BERT}_0^N\}, \{w_{\text{end}}, \text{BERT}_1^N\}, \dots, \{w_{\text{end}}, \text{BERT}_L^N\} \right])$$

где softmax – функция софтмакс, $\{\cdot, \cdot\}$ – скалярное произведение, BERT_i^N – выход с последнего слоя N для i -ого токена во входной последовательности, L – число токенов во входной последовательности.

Появление архитектуры «трансформер» [2], показавшей лучшие результаты по сравнению с присутствующими языковыми моделями, послужило началом для появления огромного количества моделей, использующих данную архитектуру. Модели использующие наработки из [2] могут быть полными «трансформерами» [3-6], могли использовать только логику кодировщика [7-10] или использовать только логику декодера [11-15].

Недостатком использования архитектуры «трансформер» является наличие большого количества параметров у модели и, следовательно, большая сложность вычисления результата. Это может быть критично для крупных онлайн сервисов, поскольку они имеют большое количество клиентов, следовательно большое количество запросов в службу поддержки. Время отклика должно быть максимально быстрым. Поэтому еще одной важной задачей в обработке естественного языка является увеличение

производительности языковых моделей при сохранении эффективности их работы.

Материалы и методы

Методы уменьшения размера нейронных сетей. Одним из подходов к увеличению скорости работы модели является уменьшение размера модели. С уменьшением размера модели происходит уменьшение количества операций, которые необходимо выполнить модели чтобы получить результат.

Основными методами уменьшения размера модели являются квантизация (quantization), прунинг (pruning) и дистилляция знаний (knowledge distillation).

Квантизация означает уменьшение численной точности весов модели. Например, изначально вес модели содержал значение типа float, то после квантизации данный вес модели будет содержать значение типа integer.

Прунинг предполагает фильтрацию частей модели, чтобы сделать ее меньше и быстрее. Популярным методом является прунинг весов модели. Данный метод удаляет веса, значения которых близки к 0. Это позволяет избавить модель от весов, значимость которых для предсказания невелика.

Дистилляция знаний заключается в том, что вначале обучается большая модель, а затем на основе предсказаний данной модели-учителя обучается более легковесная модель-ученик [16]. Данный подход показал хорошие результаты [17]. Модели-ученики могут совсем

незначительно уступать в результатах моделям-учителям, но при этом быть в несколько раз меньше и работать быстрее. По этой причине появилось большое количество дистиллированных версий популярных сетей (таких как tinyBERT, distilBERT, distilRoBERTa [18]).

Экспорт модели в формат ONNX. ONNX (Open Neural Network Exchange) [19] представляет собой открытый формат, созданный для представления моделей машинного обучения. ONNX определяет общий набор строительных блоков моделей машинного обучения. Модели в формате ONNX можно запускать в специальных средах выполнения ONNX. Данные среды выполнения содержат множество оптимизаций на аппаратном уровне. В результате модели в данной среде работают быстрее. Помимо этого, среды выполнения ONNX позволяют производить оптимизацию моделей: удалять избыточные операции, объединять некоторые операции вместе и т. д.

Набор данных для обучения сети. Основным набором данных для тренировки вопросно-ответных систем на русском языке является SberQuAD [20]. SberQuAD содержит 45328 тренировочных наборов из текста, вопроса, и ответа, 5036 валидационных наборов и 23936 проверочных наборов. К сожалению, ответы на проверочные данные не представлены публично, поэтому результаты работы модели сравниваются на валидационном наборе. Конкретный экземпляр набора данных был взят из

библиотеки Huggingface. Каждый экземпляр данных содержит следующие поля:

- context. В данном поле находится текст, к которому будет задан вопрос.
- question. В данном поле содержится вопрос к тексту из поля context.
- answers. В данном поле находится ответ на вопрос из поля question к тек-

сту из поля context. В данном поле присутствуют два поля answer_start и text. Поле answer_start содержит индекс начала ответа на вопрос, а поле text содержит полный текст ответа.

Пример тренировочных данных представлен на рис. 1.

```
{
  'id': 15008,
  'title': 'SberChallenge',
  'context': 'Корпоративный сайт – содержит полную информацию о компании-владельце, услугах/продукции, событиях в жизни компании. Отличается от сайта-визитки и представительского сайта полнотой представленной информации, зачастую содержит различные функциональные инструменты для работы с контентом (поиск и фильтры, календари событий, фотогалереи, корпоративные блоги, форумы). Может быть интегрирован с внутренними информационными системами компании-владельца (КИС, CRM, бухгалтерскими системами). Может содержать закрытые разделы для тех или иных групп пользователей – сотрудников, дилеров, контрагентов и пр.',
  'question': 'С чем может быть интегрирован корпоративный сайт?',
  'answers': {
    'text': ['с внутренними информационными системами компании-владельца (КИС, CRM, бухгалтерскими системами)'],
    'answer_start': [389]
  }
}
```

Рис. 1. Пример тренировочных данных

Fig. 1. Example of training data

Показатели. Основными показателями качества работы вопросно-ответных моделей являются ЕМ и F-мера [20].

Exact match (ЕМ) — точное совпадение, доля ответов системы, которые полностью совпадают с одним из правильных ответов с точностью до пунктуации и регистра.

F-мера — представляет собой совместную оценку полноты и точности. Данный показатель вычисляется по следующей формуле:

$$F = 2 \cdot \frac{\text{Точность} \cdot \text{Полнота}}{\text{Точность} + \text{Полнота}}.$$

Полнота (recall) вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Полнота} = \frac{TP}{TP + FN}.$$

Точность (precision) вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Точность} = \frac{TP}{TP + FP},$$

где TP — Истинноположительные предсказания модели (модель правильно отнесла объект к классу); FN — Ложноотрицательные предсказания модели (модель неправильно не отнесла объект к классу); FP — Ложноположительные предсказания модели (модель неправильно отнесла объект к классу).

Выбор основной языковой модели. Выбор модели был осуществлён на сайте библиотеки Huggingface. В качестве основной модели-учителя было принято

решение выбрать модель ruBert-base [21]. Данная модель показала одни из лучших результатов в обработке данных из набора SberQuAD.

Дистилляция. В качестве модели-ученика для дистилляции была выбрана Geotrend/distilbert-base-ru-cased [22]. Основным её плюсом является малый размер, который составляет 205.62 Мб, против 676.29 Мб у ruBert-base.

Проведение дистилляции с моделью-учителем ruBert-base и моделью-учеником Geotrend/distilbert-base-ru-cased на наборе данных SberQuAD заняло 4 часа 15 минут.

Квантизация. Языковые модели «трансформер» обычно имеют веса в формате чисел с плавающей запятой с размером 32 бит. В проводимых экспериментах формат весов моделей был изменен на целочисленный с размером 8 бит. Данная операция позволяет увеличить скорость вычислений предсказаний модели, а также уменьшить вес самой модели. Также стоит отметить, что во всех экспериментах применялась динамическая квантизация.

ONNX. Модели из библиотеки Huggingface поддерживают экспорт в формат ONNX. Данная операция позволяет запускать данные модели в оптимизированных средах выполнения. Также данные среды позволяют оптимизировать некоторые операции модели. Далее в статье запуск модели в ONNX среде выполнения и применение оптимизаций операций к этой модели будет называться ONNX оптимизация.

Результаты и их обсуждение

Описание стенда для обучения нейронной сети. Обучение и дистилляция моделей проводились на сервисе Google Colab. Данный сервис предоставляет во временное (12 часов) бесплатное пользование компьютеры с производственными видеокартами (уровня NVIDIA Tesla K80).

Эксперименты проводились на компьютере MacBook Pro (Retina, 15-inch, Mid 2015) с ЦП 2,2 GHz Quad-Core Intel Core i7 и ОЗУ 16 GB 1600 MHz DDR3.

Проведение экспериментов. За основу была взята модель ruBert-base. После дистилляции появилась еще обученная модель Geotrend/distilbert-base-ru-cased. Для каждой из этих моделей было решено провести следующие операции:

Квантизацию.

ONNX оптимизацию.

Квантизацию и ONNX оптимизацию вместе.

Для каждой модели эксперимента были получены:

Показатели EM (Exact match) и F-мера

Полное время обработки валидационного (5389 вопросов) набора данных из SberQuAD (минуты).

Производительность (количество обработанных запросов в минуту).

Размер модели (Мб).

Результаты работы моделей представлены в табл. 1, рис. 2 и рис. 3.

Обсуждение результатов экспериментов. Дистилляция знаний из модели

ruBert-base в модель Geotrend/distilbert-base-ru-cased позволила почти в 1.7 раза сократить время обработки (с ~81 ми-

нуты до 47 минут), а также уменьшить размер модели в ~3.3 раза (с 676.29 до 205.62 Мб).

Таблица 1. Результаты работы моделей

Table 1. Model Results

Версия модели / Model version	ЕМ	F-1	Размер модели (Мб) / Model size	Время обработки валидационного набора данных (мин) / Treatment Time of Validation Data Set (min)	Количество за- просов в вали- дационном наборе данных / Number of que- ries in validation dataset	Производитель- ность (запросы в минуту) / Productivity (re- quests per mi- nute)
ruBert-base	61.3	81.66	676.29	80.95	5389	66.57
ruBert-base + квантизация	59.21	80.54	433.34	36.73		146.71
ruBert-base + ONNX опти- мизация	61.3	81.66	676.31	30		179.63
ruBert-base + ONNX опти- мизация + квантизация	61.51	81.96	169.55	28		192.46
distilbert-base- ru-cased	58.57	78.42	205.62	47		114.65
distilbert-base- ru-cased + квантизация	52.28	72.62	84.15	20.15		267.44
distilbert-base- ru-cased + ONNX опти- мизация	58.57	78.42	205.63	18		299.38
distilbert-base- ru-cased + квантизация + ONNX опти- мизация	56.87	76.97	51.66	17.7		304.46

Квантизация для обеих моделей позволила чуть больше чем в 2 раза уменьшить время обработки (с ~81 минуты до ~37 минут для ruBert-base и с

47 минут до ~21 минуты для Geotrend/distilbert-base-ru-cased), но в обоих случаях пострадали показатели ЕМ и F-мера. Для модели ruBert-base падение

метрик является незначительным (с EM 61.3 и F-мера 81.66 до EM 59.21 и F-мера 80.54). В случае с моделью Geotrend/distilbert-base-ru-cased наблюдается максимальное падение показателей среди всех методов оптимизации (с EM 58.57 и F-мера 78.42 до EM 52.28 и F-мера 72.62). После квантизации модель ruBert-base стала на 35% меньше (с 676.29 Мб до 433.34 Мб), а модель Geotrend/distilbert-base-ru-cased стала на

59% меньше (с 205.62 Мб до 84.15 Мб). Применение ONNX оптимизации позволило сохранить показатели EM и F-мера, а также размер модели неизменными, но уменьшить время обработки более чем в 2 раза. Для модели ruBert-base время обработки сократилось на 62% (с ~81 минуты до 30 минут), а для модели Geotrend/distilbert-base-ru-cased - на 61% (с 47 минут до ~20 минут).

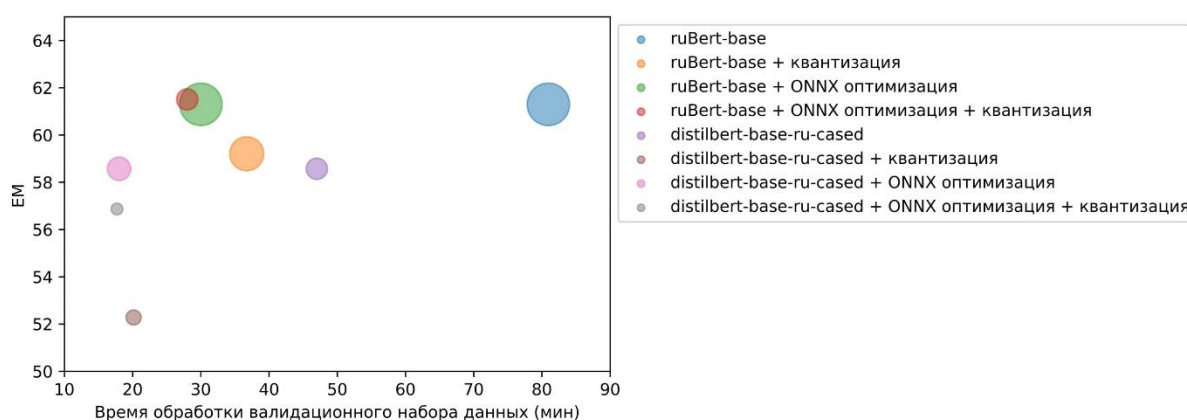


Рис. 2. Показатель EM и время обработки для проведенных экспериментов

Fig. 2. EM metric and processing time for the experiments performed

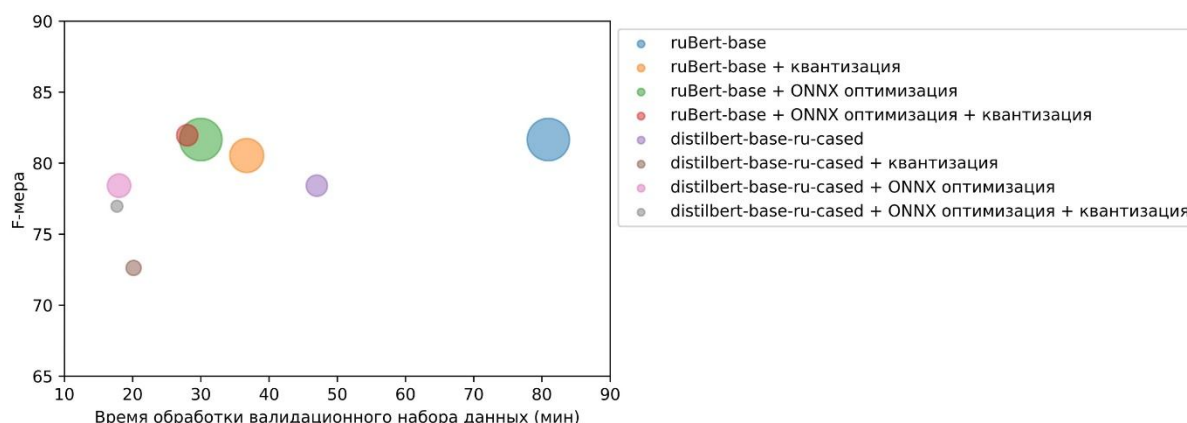


Рис. 3. Показатель F-мера и время обработки для проведенных экспериментов

Fig. 3. F₁ metric and processing time for experiments performed

Добавление квантизации к ONNX оптимизации незначительно снизило время обработки, но позволило еще

сильнее уменьшить размер модели. После ONNX оптимизации с квантизацией модель ruBert-base стала на 75% меньше

(с 676.29 Мб до 169.55 Мб), а модель Geotrend/distilbert-base-ru-cased - на 74% меньше (с 205.62 Мб до 51.66 Мб). Однако, стоит отметить, что если в случае с моделью ruBert-base показатели EM и F-мера немного выросли (с EM 61.3 и F-мера 81.66 до EM 61.51 и F-мера 81.96), то в случае с моделью данные показатели ухудшились (с EM 58.57 и F-мера 78.42 до EM 56.87 и F-мера 76.97).

Худшие результаты по времени обработки валидационного набора данных показала оригинальная модель ruBert-base (~91 минута). Лучшие результаты показала модель Geotrend/distilbert-base-ru-cased в эксперименте с ONNX оптимизацией (18 минут) и в эксперименте с ONNX оптимизацией и квантизацией (~18 минут).

Худшие результаты относительно размера модели также показала оригинальная модель ruBert-base (676.29 Мб). Лучшие результаты показала модель distilbert-base-ru-cased в эксперименте с квантизацией (84.15 Мб) и в эксперименте с ONNX оптимизацией и квантизацией (51.66 Мб).

Модель distilbert-base-ru-cased из эксперимента с ONNX оптимизацией и

квантизацией имеет наименьший размер (51.66 Мб) и наименьшее время выполнения (~18 минут) среди всех других комбинаций оптимизаций. Данная модель смогла обработать валидационный набор данных на 78% быстрее по сравнению с оригинальной моделью (ruBert-base). Но данная модель имеет одни из худших метрик EM 56.87 и F-мера 76.97. Однако стоит отметить, что, учитывая высокую скорость работы данное ухудшение качества модели может быть приемлемым.

Выводы

В результате, модель, к которой одновременно были применены дистилляция знаний, квантизация и ONNX оптимизация, получила увеличение производительности в ~4.6 раза (с 66.57 до 404.46 запросов в минуту), при этом размер модели уменьшился в ~13 раз (с 676.29 Мб до 51.66 Мб). Обратной стороной полученной производительности стало ухудшение показателей EM (с 61.3 до 56.87) и F-мера (с 81.66 до 76.97).

Список литературы

1. Рябинов А.В., Уздяев М.Ю., Ватаманюк И.В. Применение многозадачного глубокого обучения в задаче распознавания эмоций в речи // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 82-109. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-82-109>
2. Vaswani A. et al. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems 2017-December, 5999–6009 (Neural information processing systems foundation, 2017).

3. Lewis M. et al. BART: Denoising Sequence-to-Sequence Pre-training for Natural Language Generation, Translation, and Comprehension. in 7871–7880 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).
4. Raffel C. et al. Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer // Journal of Machine Learning Research 21, (2020).
5. Zhang J., Zhao Y., Saleh M., Liu P. J. PEGASUS: Pre-Training with extracted gap-sentences for abstractive summarization // 37th International Conference on Machine Learning, ICML 2020 PartF168147-15, 11265–11276 (International Machine Learning Society (IMLS), 2020).
6. Qi W. et al. ProphetNet: Predicting future n-gram for sequence-to-sequence pre-training // Findings of the Association for Computational Linguistics Findings of ACL: EMNLP 2020 2401–2410 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).
7. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding // NAACL HLT 2019 - 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies - Proceedings of the Conference 1, 4171–4186 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2019).
8. Lan Z. et al. ALBERT: A Lite BERT for Self-supervised Learning of Language Representations. in ICLR (OpenReview.net, 2020).
9. Liu Y. et al. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. CoRR abs/1907.11692, (2019).
10. Clark K., Luong M.-T., Le Q. V., Manning, C. D. ELECTRA: Pre-training Text Encoders as Discriminators Rather Than Generators. CoRR abs/2003.10555, (2020).
11. Dai Z. et al. Transformer-XL: Attentive language models beyond a fixed-length context // ACL 2019 - 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference 2978–2988 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).
12. Keskar N. S., McCann B., Varshney L. R., Xiong C., Socher R. CTRL: A Conditional Transformer Language Model for Controllable Generation. CoRR abs/1909.05858, (2019).
13. Radford A., Narasimhan K., Salimans T., Sutskever I. (OpenAI Transformer): Improving Language Understanding by Generative Pre-Training. OpenAI 1–10 (2018).
14. Alec Radford, Jeffrey Wu, Rewon Child, David Luan, Dario Amodei, I. S. Language Models are Unsupervised Multitask Learners. OpenAI Blog 1, 1–7 (2020).
15. Brown T. B. et al. Language models are few-shot learners // Advances in Neural Information Processing Systems 2020-December, (Neural information processing systems foundation, 2020).

16. Hahn S., Choi H. Self-knowledge distillation in natural language processing // International Conference Recent Advances in Natural Language Processing, RANLP 2019-September, 423–430 (Incoma Ltd, 2019).
17. Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf T. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. CoRR abs/1910.01108, (2019).
18. Li T., El Mesbahi Y., Kobzyev I., Rashid A., Mahmud A., Anchuri N., Hajimolaho-seini H., Liu Y., Rezagholizadeh M. A Short Study on Compressing Decoder-Based Language Models. CoRR abs/2110.08460 (2021).
19. Le T. D. et al. Compiling ONNX Neural Network Models Using MLIR. CoRR abs/2008.08272, (2020).
20. Efimov P., Chertok A., Boytsov L., Braslavski, P. SberQuAD – Russian Reading Comprehension Dataset: Description and Analysis // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 12260 LNCS, 3–15 (Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020).
21. Kuratov Y., Arkhipov M. Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language // Komp'yuternaja Lingvistika i Intellektual'nye Tehnologii 2019-May, 333–339 (ABBYY PRODUCTION LLC, 2019).
22. Abdaoui A., Pradel C., Sigel G. Load What You Need: Smaller Versions of Multilingual BERT. in 119–123 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).

References

1. Ryabinov A.V., Uzdiaev M.Yu., Vatamaniuk I.V. [Applying Multitask Deep Learning to Emotion Recognition in Speech]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2021;25(1):82-109. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-82-109>.
2. Vaswani A. et al. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems 2017-December*, 5999–6009 (Neural information processing systems foundation, 2017).
3. Lewis M. et al. BART: Denoising Sequence-to-Sequence Pre-training for Natural Language Generation, Translation, and Comprehension. in 7871–7880 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).
4. Raffel C. et al. Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. *Journal of Machine Learning Research* 21, (2020).
5. Zhang J., Zhao Y., Saleh M., Liu P. J. PEGASUS: Pre-Training with extracted gap-sentences for abstractive summarization. *37th International Conference on Machine Learning, ICML 2020 PartF168147-15*, 11265–11276 (International Machine Learning Society (IMLS), 2020).

6. Qi W. et al. ProphetNet: Predicting future n-gram for sequence-to-sequence pre-training. *Findings of the Association for Computational Linguistics Findings of ACL: EMNLP 2020*; 2401–2410 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).
7. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *NAACL HLT 2019 - 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies - Proceedings of the Conference 1*, 4171–4186 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2019).
8. Lan Z. et al. ALBERT: A Lite BERT for Self-supervised Learning of Language Representations. in ICLR (OpenReview.net, 2020).
9. Liu Y. et al. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. CoRR abs/1907.11692, (2019).
10. Clark K., Luong M.-T., Le Q. V., Manning C. D. ELECTRA: Pre-training Text Encoders as Discriminators Rather Than Generators. CoRR abs/2003.10555, (2020).
11. Dai Z. et al. Transformer-XL: Attentive language models beyond a fixed-length context. *ACL 2019 - 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference*, 2978–2988 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).
12. Keskar N. S., McCann B., Varshney L. R., Xiong C., Socher R. CTRL: A Conditional Transformer Language Model for Controllable Generation. CoRR abs/1909.05858, (2019).
13. Radford A., Narasimhan K., Salimans T., Sutskever I. (OpenAI Transformer): Improving Language Understanding by Generative Pre-Training. OpenAI 1–10 (2018).
14. Alec Radford, Jeffrey Wu, Rewon Child, David Luan, Dario Amodei, I. S. Language Models are Unsupervised Multitask Learners. OpenAI Blog 1, 1–7 (2020).
15. Brown T. B. et al. Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems 2020-December*, (Neural information processing systems foundation, 2020).
16. Hahn S., Choi H. Self-knowledge distillation in natural language processing. *International Conference Recent Advances in Natural Language Processing, RANLP 2019-September*, 423–430 (Incoma Ltd, 2019).
17. Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf T. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. CoRR abs/1910.01108, (2019).
18. Li T., El Mesbahi Y., Kobayev I., Rashid A., Mahmud A., Anchuri N., Hajimolaho-seini H., Liu Y., Rezagholizadeh M. A Short Study on Compressing Decoder-Based Language Models. CoRR abs/2110.08460 (2021).
19. Le T. D. et al. Compiling ONNX Neural Network Models Using MLIR. CoRR abs/2008.08272, (2020).

20. Efimov P., Chertok A., Boytsov L., Braslavski P. SberQuAD – Russian Reading Comprehension Dataset: Description and Analysis. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 12260 LNCS, 3–15 (Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020).

21. Kuratov Y., Arkhipov M. Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language. *Komp'yuternaja Lingvistika i Intellekturnye Tehnologii* 2019-May, 333–339 (ABBYY PRODUCTION LLC, 2019).

22. Abdaoui A., Pradel C., Sigel G. Load What You Need: Smaller Versions of Multilingual BERT. in 119–123 (Association for Computational Linguistics (ACL), 2020).

Информация об авторах / Information about the Authors

Галеев Денис Талгатович, аспирант,
Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ra3wvw@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-1800>

Denis T. Galeev, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: ra3wvw@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7677-1800>

Панищев Владимир Славиевич, кандидат
технических наук, Юго-Западный
государственный университет
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: gskunk@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1772-7663>

Vladimir S. Panishchev, Cand. of Sci.
(Engineering), Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: gskunk@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1772-7663>

Титов Дмитрий Витальевич, доктор
технических наук, доцент, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: titov.swsu@gmail.com

Dmitry V. Titov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: titov.swsu@gmail.com

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 (Ω , η , β , μ , ω , ν 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>.