

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 29 № 1 / 2025



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 29 № 1 / 2025



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

В журнале публикуются оригинальные работы, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

Бычков Игорь Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова (г.Иркутск, Россия);

Грибова Валерия Викторовна, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток, Россия);

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

Казанцев Виктор Борисович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт биологии и биомедицины Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия);

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

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

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

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

Новиков Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, академик РАН, 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);

Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Россия);

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

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

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

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

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

Черный Сергей Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет (г. Керчь, 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, Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

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

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

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

Езов 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 (Россия);

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

Латышов 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 №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2025



Материалы журнала доступны по лицензии 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 10.04.2025.

Дата выхода в свет 16.06.2025. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 20,1.

Тираж 1000 экз. Заказ 22.

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 in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

Igor V. Bychkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory (Irkutsk, Russia);

Sergey G. Cherny, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Kerch State Marine Technological University (Kerch, Russia);

Valeria V. Gribova, Dr. of Sci. (Engineering), Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia);

Viktor B. Kazantsev, Dr. of Sci. (Physical and Mathematical), Professor, Institute of Biology and Biomedicine of the National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky;

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

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

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

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

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

Dmitry A. Novikov, Dr. of Sci. (Engineering),
Academician 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);

Grigori 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);

Andrey L. Ronzhin, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, St. Petersburg Federal Research Center of the
Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, 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);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, 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, Southwest State
University (Kursk, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

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

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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

Subscription and distribution:

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

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2025



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

Singed to print 14.04.2025.

Release date 16.06.2025. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 20,1.

Circulation 1000 copies. Order 22.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Метод для определения наклона столба линии связи на основе изображений с БПЛА	8
<i>Заикин М. И., Астапова М.А., Волков Д.М.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Проблемы искусственного интеллекта в строительстве	27
<i>Чекардовский С.М., Чекардовская И.А., Бурцев А.П.</i>	
Коаксиальное локальное вытяжное устройство	40
<i>Сиваченко Ю. А., Зайцев О. Н., Бурцев А. П.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Взаимодействие когнитивных и реактивных агентов в интеллектуальной вычислительной системе: принципы организации	52
<i>Карамышева Н.С., Зинкин С.А.</i>	
Модели и алгоритм анализа реестра должников энергосбытовой компании на основе low-code платформы Logipom	79
<i>Серова Ю. И., Ханова А. А., Гурская Т. Г.</i>	
Модель поверхности атак для сложных систем на основе микросервисной архитектуры.....	96
<i>Миронова В. Г.</i>	
Подход для измерения геометрических параметров объектов с использованием цифровых камер	107
<i>Коновалов К. Д.</i>	
Разработка метода уменьшения эффекта размытия снимков объектов на конвейерных линиях с помощью подвижных камер	123
<i>Бушув Д.А., Огурцов С.Н.</i>	
Метод измерения температуры на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на термометр сопротивления	136
<i>Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Калмыков А. И.</i>	
Методика анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем.....	155
<i>Петушков Г. В.</i>	
К сведению авторов	173

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Method for determining the inclination of a communication line pole based on UAV images.....8

Zaikin M. I., Astapova M. A., Volkov D. M.

CONSTRUCTION

Original articles

Problems of artificial intelligence in construction27

Chekardovsky S. M., Chekardovskaya I. A., Burtsev A. P.

Coaxial local exhaust device40

Sivachenko Y. A., Zaitsev O. N., Burtsev A. P.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

**Interaction of cognitive and reactive agents in an intelligent computing system:
principles of organization52**

Karamysheva N. S., Zinkin S. A.

**Models and algorithm for analyzing the register of debtors of an energy supply company based
on the Loginom low-code platform79**

Serova Y. I., Khanova A. A., Gurskaya T. G.

Attack surface model for complex systems based on microservice architecture.....96

Mironova V. G.

Approach for measuring geometric parameters of objects using digital cameras 107

Konovalov K. D.

**Development of a method for reducing motion blur in images of objects on conveyor lines
using moving cameras 123**

Bushuev D. A., Ogurtsov S. N.

**Method for temperature measurement based on integration of the transient process part
of the condenser discharge on a resistance thermometer 136**

Bondar O. G., Brezhnev E. O., Kalmykov A. I.

Methodology of reliability analysis and monitoring of aircraft operation..... 155

Petushkov G. V.

Information of the authors 173

УДК 004.932

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-8-26>



Метод для определения наклона столба линии связи на основе изображений с БПЛА

М. И. Заикин ¹, М.А. Астапова ¹ ✉, Д.М. Волков ¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: astapova.m@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования. Воздушные линии связи (ВЛС) являются важным элементом коммуникационной инфраструктуры, однако их техническое состояние требует регулярного контроля и осмотра. Традиционные методы осмотра, включающие визуальную проверку специалистами, не всегда позволяют эффективно собирать и фиксировать все необходимые данные. С целью улучшения качества осмотра ВЛС был разработан метод для определения наклона столба линии связи на основе изображений с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Методы. Для решения задачи использовалась комбинация математических преобразований и методов машинного обучения. Обработка данных включала использование параметров камеры, координат объекта на изображении, высоты полета и координат БПЛА. На основе этих данных разрабатывался алгоритм детекции ключевых точек опоры и расчета угла наклона столбов.

Результаты. В результате проведенных экспериментов на основе данных, полученных с БПЛА, была достигнута точность детектирования ключевых точек опоры по метрике mAP50 равна 0,71. В пределах корректно предсказанной опоры точность детекции ее вершины и основания составила 0,88 по метрике F1-score. Для определения наклона столбов ВЛС была выведена формула, которая позволила рассчитать максимальный наклон столба – 24,5°, а минимальный – 0,6°. Средний угол наклона опор для всего набора изображений составил примерно 6,1°.

Заключение. Разработанный метод позволяет автоматизировать процесс технического осмотра ВЛС, обеспечивая высокую точность определения их ключевых параметров. Применение БПЛА и машинного обучения снижают временные и финансовые затраты, а также улучшает качество сбора и анализа данных. Использование БПЛА в сочетании с методами машинного обучения позволяет значительно сократить временные и финансовые затраты, повышают качество сбора и анализа данных и снижают риск ошибок, связанных с человеческим фактором.

Ключевые слова: воздушные линии связи; глубокое обучение; беспилотная воздушная система; детекция объектов на изображении.

© Заикин М. И., Астапова М.А., Волков Д.М., 2025

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

Для цитирования: Заикин М. И., Астапова М.А., Волков Д.М. Метод для определения наклона столба линии связи на основе изображений с БПЛА // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 8-26. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-8-26>.

Поступила в редакцию 03.12.2024

Подписана в печать 30.01.2025

Опубликована 14.04.2025

Method for determining the inclination of a communication line pole based on UAV images

Mikhail I. Zaikin¹, Marina A. Astapova¹ ✉, Danila M. Volkov¹

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

✉ e-mail: astapova.m@ias.spb.su

Abstract

Purpose of research. Overhead communication lines (OCL) are an important element of the communication infrastructure, but their technical condition requires regular monitoring and inspection. Traditional inspection methods, including visual inspection by specialists, do not always allow for the efficient collection and recording of all necessary data. In order to improve the quality of OCL inspection, a method was developed for determining the tilt of a communication line pole based on images from an unmanned aerial vehicle (UAV).

Methods. A combination of mathematical transformations and machine learning methods was used to solve the problem. Data processing included the use of camera parameters, object coordinates in the image, flight altitude, and UAV coordinates. Based on these data, an algorithm was developed for detecting key support points and calculating the tilt angle of the poles.

Results. As a result of the experiments conducted based on the data obtained from the UAV, the accuracy of detecting key support points according to the mAP50 metric was 0.71. Within the correctly predicted support, the accuracy of detecting its top and base was 0.88 according to the F1-score metric. To determine the tilt of the VLS pillars, a formula was derived that made it possible to calculate the maximum tilt of the pillar is 24.5°, and the minimum is 0.6°. The average tilt angle of the pillars for the entire set of images is approximately 6.1°.

Conclusion. The developed method allows automating the technical inspection of VLS, ensuring high accuracy in determining their key parameters. The use of UAVs and machine learning reduces time and cost, and improves the quality of data collection and analysis. The use of UAVs in combination with machine learning methods can significantly reduce time and cost, improve the quality of data collection and analysis, and reduce the risk of human error.

Keywords: overhead communication lines; deep learning; unmanned aerial vehicle; image object detection.

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

For citation: Zaikin M. I., Astapova M. A., Volkov D. M. Method for determining the inclination of a communication line pole based on UAV images // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 8-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-8-26>.

Received 03.12.2024

Accepted 30.01.2025

Published 14.04.2025

Введение

ВЛС являются основой современной коммуникационной инфраструктуры, обеспечивая стабильную передачу информации и связь между различными системами. Для обеспечения их надежной работы необходимо регулярное техническое обслуживание и мониторинг состояния. Обычно для осмотра ВЛС применяются традиционные методы, предполагающие участие специалистов, которые проводят визуальные проверки на месте. Такие методы, как правило, требуют значительных затрат времени и средств, особенно при обследовании удаленных и труднодоступных участков. Кроме того, ручную выполняемые осмотры не всегда дают точные результаты, что повышает вероятность пропуска дефектов. Трудности, возникающие при получении точных данных, могут привести к недостаточному контролю за состоянием линий, что повышает риск неисправностей и аварий. В связи с этим возникает потребность в оптимизации процессов мониторинга состояния ВЛС. Современные разработки, такие как БпЛА, оснащенные камерами высокого разрешения и искусственным интеллектом для анализа данных, позволяют значительно повысить качество мониторинга объектов [1, 2]. Данные технологии обеспечивают не только ускорение процессов проверки элементов объектов и снижение затрат на проведение работ, но и повышение точно-

сти и безопасности при проведении осмотров.

БпЛА становятся все более востребованными для задач мониторинга территорий [3, 4] и построения карт [5], включая анализ состояния опор воздушных линий связи, благодаря своей мобильности, точности и способности оперативно формировать данные о труднодоступных участках [6]. БпЛА показали свою эффективность при проведении инспекций линий электропередач [7]. Различные типы БпЛА, включая устройства с фиксированными крыльями для общего осмотра, а также шестироторные и многороторные аппараты, используемые для детальных осмотров, функционально дополняют друг друга, повышая общую эффективность и скорость выполнения задач, особенно в сложных ландшафтных условиях [8]. Данные передаются в реальном времени, позволяя специалистам оперативно принимать решения и выявлять потенциальные угрозы до возникновения проблем. Использование тепловизоров и инфракрасных камер на БпЛА позволяет обнаруживать скрытые дефекты и участки с перегревом, которые могут указывать на наличие внутренних повреждений или начальные стадии разрушения материала. Эффективным способом анализа видеоряда, полученных с БпЛА являются методы компьютерного зрения, основанного на глубоком обучении [9]. БпЛА используется для получения видеоряда, содержащего опоры ВЛС.

Для оценки состояния опоры необходимо классифицировать детектируемые объекты опор на изображении или определения угла наклона опоры. Однако оба метода имеют определенные ограничения. Так, чтобы добиться высокой точности в классификации требуется большое количество данных для обучения модели. В связи с этим, метод определения угла наклона на основе изображения опоры представляется наиболее предпочтительным вариантом.

Использование нейронных сетей для обработки изображений с БПЛА имеет преимущества: они адаптируются к изменениям, шуму и эффективно обрабатывают большие объемы данных, репрезентативной выборки и качественной разметкой. Кроме того, яркость, насыщенность и резкость изображения зависят от таких факторов, как время суток, состояние камеры, тип камеры, время года и других параметров. Нейронные сети позволяют обобщать информацию об анализируемых объектах, что позволяет эффективно обрабатывать их содержимое.

Существует множество методов для определения наклона столбов ВЛС, включая использование БПЛА, датчиков, NB-IoT, LiDAR и машинного обучения. Так, в статье [10] рассматривается метод онлайн-мониторинга наклона опоры ВЛС на основе патрульного БПЛА и камеры. Для сбора данных облака точек изображения опоры ВЛС применяется пирамидальное управление градацией. Эти данные предварительно обрабаты-

ваются для устранения ошибок, а данные облака точек гомогенизируются для получения многомасштабных характеристик. На этой основе разрабатывается многомасштабный классификатор для автоматической классификации данных облака точек. Результаты испытаний показывают, что предложенный метод позволяет эффективно контролировать угол наклона опоры ВЛС при различных ветровых условиях, при этом максимальное отклонение между измеренным и фактическим углом наклона составляет около $0,3^\circ$.

В исследовании [11] предлагается метод, который обрабатывает данные об опоре из 2D-изображения и 3D-облака точек для автоматического измерения угла наклона опоры. На первом этапе извлекается маска скелета опоры с помощью усовершенствованного алгоритма Mask R-CNN. Затем облако точек опоры извлекается с помощью PointNet, который обрабатывает фрустум, созданный из маски скелета опоры и карты глубины. На последнем этапе угол наклона вычисляется путем подгонки центральной оси облака точек опоры. Экспериментальные результаты показывают, что AP75 улучшенной Mask R-CNN составляет 58,15%, точность PointNet – 92,4%, средняя ошибка наклона полюса – $0,66^\circ$, а дисперсия – $0,12^\circ$.

Авторами [12] представлена разработка алгоритма PTTE для оценки наклона опор ЛЭП на основе облаков точек, полученных с помощью LiDAR с БПЛА. Метод использует сеть SCF-Net для се-

математического сегментирования энергетических объектов в сцене после сбора данных о ЛЭП с помощью БПЛА, а затем применяется кластеризация K-means для получения отдельных башен. Затем извлеченные отдельные опоры используются для предложения алгоритма оценки наклона опор, основанного на подгонке плоскости облака точек cross-stretcher и normal estimation. Эксперименты, проведенные на реальных данных электропередач, показали, что индекс IOU для классификации столбов электропередач с использованием сети SCF-Net достигает 97,75.

Целью работы [13] является разработка алгоритма расчета угла наклона опор ВЛС. Был создан алгоритм, который позволяет идентифицировать объекты на изображении с использованием нейронной сети YOLOv3 и определять края опор путем построения прямых линий вдоль них. Для идентификации наклона опор в полученных ограничивающих прямоугольниках применены методы машинного зрения (алгоритм Canny, Hough Line, GrabCut). Точность классификации металлических и бетонных столбов составила 91,11% и 91,08% соответственно, с относительно небольшим количеством ошибочных классификаций. Алгоритм был протестирован на 99 изображениях, полученных с БПЛА. Средняя относительная погрешность алгоритма составила 11,5%.

В статье [14] авторы исследуют метод мониторинга состояния наклона опоры передачи на основе технологии NB-

IoT. Для измерения угла наклона опоры выбран 6-осевой датчик положения GY-521, использующий микросхему датчика ускорения MPU6050 для цифрового вывода данных 6-осевой матрицы вращения в алгоритм слияния. Также для сбора данных о состоянии опоры ЛЭП используются датчик ветра и датчик натяжения. Сеть NB-IoT используется для передачи обработанных данных, очищенных от шума, на базовую станцию, откуда они передаются на верхний компьютер. Далее данные анализируются с помощью LSTM-сети для получения результатов мониторинга состояния наклона опоры ВЛС. Экспериментальные результаты показывают, что максимальная среднеквадратичная ошибка предлагаемого метода мониторинга составляет всего 0,02701, что значительно меньше, чем у метода сравнения Real-Time Kinematic Positioning (RTK).

В работе [15] предложен метод оценки наклона опор ВЛС на основе плотных облаков точек, полученных с помощью LiDAR, установленного на БПЛА. Для сегментации данных облака точек корпуса опоры использовались многомерные геометрические структурные особенности облака точек 3D-лазера опоры. Затем были извлечены плоскости и высоты опоры, которые объединили с гистограммой высот. Внешние контуры опоры были получены с помощью алгоритмов Alpha Shapes и Pipeline. Данные были собраны с использованием БПЛА, оснащенного датчиком VUX-1 LiDAR. Экспериментальный набор данных вклю-

чал 157 вышек передачи, классифицированных на шесть категорий. Результаты моделирования и измерений показали, что точность расчета параметров наклона корпуса опоры ЛЭП составляет более $0,5^\circ$.

В статье [16] авторы предложили систему мониторинга для автоматического измерения угла наклона опор ВЛС по изображениям, полученным с БПЛА. Метод состоит из трех основных этапов: захват изображений опор с помощью БПЛА, сегментация столбов на изображениях с использованием нейронной сети глубокого обучения и расчет угла наклона каждого столба с применением методов компьютерного зрения. Для обнаружения и измерения углов наклона опор была выбрана нейронная сеть SegNet. Модель была переобучена для решения задачи сегментации коммунальных столбов с использованием ограниченного набора классов (например, столбы, небо, дороги, растительность) для повышения точности. После сегментации столбы были проанализированы с помощью методов компьютерного зрения, включая преобразование Хафа, для расчета углов наклона. Метод был протестирован на 64 изображениях, содержащих 84 опоры линий электропередач, снятых в различных погодных условиях. Точность сегментации опор составила 93,74%, а средняя ошибка угла наклона $0,59^\circ$.

В исследовании [17] предложен метод мониторинга наклона столба с помощью БПЛА, основанный на спутниковой

навигации BeiDou. Для распознавания столбов были использованы Cascading Fusion Attention (CFA) и улучшенная версия DarkNet53 на основе YOLOv3, при этом значение F достигло 85,1%. Для определения наклона столба применялись алгоритм Canny и метод обнаружения прямых линий LSD, которые использовались для выделения центральной линии и вычисления угла наклона. Итоговая точность метода составила 87,4%.

Таким образом, основные существующие методы для задач определения наклона столба линии связи – БПЛА с камерой, 2D+3D облака точек, LiDAR-Based, глубокое обучение+изображения, NB-IoT и т.п. Каждый метод имеет компромиссы между точностью, стоимостью и сложностью. Для высокой точности идеальными являются методы на основе LiDAR или интеграция 2D-3D облака точек, в то время как глубокое обучение и обработка изображений предлагают масштабируемые и экономически эффективные альтернативы. Современные методы в основном используют сегментацию или обнаружение краев, использование новейших нейросетевых моделей обнаружения объектов – подход, который может потенциально повысить точность.

Целью исследования является предложение нового эффективного метода для определения наклона опор ВЛС с использованием БПЛА, который выполняет инспекцию опор и собирает видеоданные о состоянии элементов опор ВЛС. Для

обеспечения стабильности и точности предсказания координат опор ВЛС применён метод оптического потока, который позволяет вычислять межкадровое расстояние, пройденное БПЛА между кадрами [18].

Предлагаемый метод актуален для решения растущей потребности в автоматизированном и экономически выгодном мониторинге углов наклона объектов инфраструктуры. Его новизна заключается в использовании YOLOv8-Pose для детекции опор для задачи оценки наклона столба, который пока недостаточно исследован в данной области. Однако YOLOv8 хорошо показал свою эффективность в таких задачах, как обнаружение посторонних предметов на линии электропередачи на основе аэрофотоснимков [19], обнаружения опор линий электропередач на основе оптических спутниковых изображений [20].

Материалы и методы

Предлагаемый метод основан на использовании БПЛА и современных методов компьютерного зрения для контроля наклона ВЛС. Процесс представлен в виде последовательности этапов (рис.1).

Этапы контроля наклона столба ВЛС:

- Пролет БПЛА над опорами ВЛС на заданном маршруте. На борту БПЛА находится GPS-датчик и камера, которые отвечают за формирование необходимых для анализа состояния опор данных. Сбор видеоданных о визуальном состоянии опор.

- Обработка каждого кадра видеоряда моделью YOLOv8-pose. Модель детектирует опоры ВЛС на изображении, а также ключевые точки: основание и вершину опоры.

- Вычисления географических координат для каждой опоры ВЛС по координатам объекта на изображении.

- Повторный пролет БПЛА по определенным на предыдущем шаге координатам опор.

- Детекция опор ВЛС на полученном видеоряде.

- Данные из нейронной сети используются для расчета угла наклона опоры ВЛС. Для каждой опоры определяется, насколько опасно она наклонена.

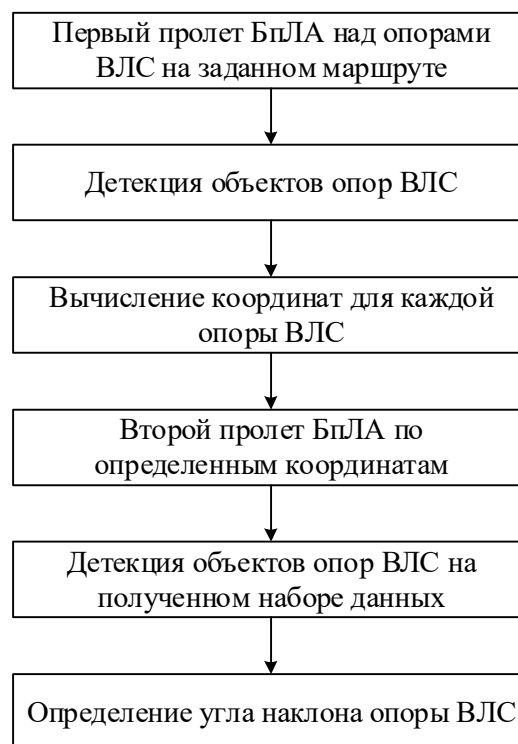


Рис. 1. Блок-схема метода для определения наклона столба линии связи

Fig. 1. Block diagram of the method for determining the inclination of a communication line pole

Таким образом, метод состоит из 3 шагов: вычисление координат и привязка к карте; детекция опор ВЛС с использованием YOLO-v8-Pose; определение угла наклона опоры ВЛС по введенной формуле (1).

YOLO-v8-Pose

YOLO-Pose [21] представляет собой подход для детекции ключевых точек на 2D изображении, интегрированный в архитектуру YOLO для детектирования объектов. В отличие от традиционных подходов, использующих тепловые карты и постобработку, YOLO-Pose позволяет обходиться без них. Основная задача подхода напрямую оптимизировать метрику Object Keypoint Similarity (OKS) в процессе обучения, что повышает его устойчивость и эффективность в решении задач оценки ключевых точек. YOLO-Pose использует архитектуру YOLO, что позволяет одновременно детектировать и определять позы нескольких людей за один цикл работы модели. Это упрощает процесс, устраняя необходимость в многократных вычислениях и группировке ключевых точек.

В YOLO-Pose математическая модель основывается на принципах якорей для определения поз и оптимизации функции потерь через OKS. Для каждого обнаруженного объекта на изображении создается якорь, который хранит полную 2D-позу и ограничивающую рамку. Координаты рамки трансформируются относительно центра якоря, а ключевые

точки предсказываются относительно этого центра.

YOLO-Pose использует Complete IoU (CIoU) для оптимизации ограничивающих рамок. Функция потерь CIoU формулируется следующим образом:

$$\mathcal{L}_{CIoU}(x, y, w, h) = 1 - CIoU(predicted\ box, ground\ truth\ box)$$

Здесь (x, y, w, h) представляют координаты центра и размеры рамки. $CIoU$ учитывает геометрическую близость и размер, что помогает модели лучше справляться с различиями в масштабах.

В отличие от традиционной L1-функции потерь, YOLO-Pose оптимизирует OKS, что улучшает регрессию ключевых точек. Формула OKS рассматривается аналогично IoU, где каждая ключевая точка взвешивается в зависимости от её значимости:

$$\mathcal{L}_{OKS} = 1 - \sum_i \exp\left(-\frac{d_i^2}{2s_i^2}\right) \cdot I(v_i > 0).$$

Здесь d_i – расстояние между предсказанным и истинным положением ключевой точки i ; s_i – фактор масштабирования, а $I(v_i > 0)$ – индикатор видимости точки. Такой подход позволяет учитывать как масштаб объекта, так и значимость каждой ключевой точки, что повышает точность определения положения объектов. Полная функция потерь в YOLO-Pose сочетает ошибки предсказания ограничивающих рамок и ключевых точек, применяя весовые коэффициенты для обеспечения сбалансированного вклада каждого компонента.

Метод оптического потока

Потребность в оценке межкадрового движения БПЛА возникает из-за отсутствия обновленных координат для каждого кадра. Для определения межкадрового расстояния используется метод оптического потока, который позволяет анализировать перемещение объекта между последовательными кадрами.

Для вычисления плотного оптического потока используется Farneback Algorithm [22]. Этот алгоритм позволяет оценивать движение каждого пикселя в последовательности изображений, аппроксимируя локальные изменения интенсивности с помощью квадратичного полинома. Это дает возможность учитывать сложные движения и получать детализированные векторные поля для перемещений между кадрами.

Алгоритм предполагает, что интенсивность пикселя $I(x, y)$ в окрестности точки (x, y) может быть аппроксимирована квадратичной функцией:

$$I(x) \approx x^T A x + b^T x + c,$$

где x – вектор положения пикселя; A – симметричная матрица; b – вектор; c – скаляр. Это позволяет локально аппроксимировать изменение интенсивности с учетом всех направлений.

В случае сдвига изображения на Δx , интенсивность в новой позиции представляется следующим образом:

$$I(x + \Delta x) \approx (x + \Delta x)^T A (x + \Delta x) + b^T (x + \Delta x) + c.$$

Сравнение интенсивности между двумя кадрами позволяет оценить величину и направление сдвига Δx , что соответствует вектору потока.

Для учета движения на различных масштабах алгоритм использует гауссову пирамиду. На каждом уровне пирамиды изображение уменьшается, что позволяет обнаруживать как мелкие, так и крупные движения. Грубая оценка поля потока выполняется на самом низком уровне и затем постепенно уточняется по мере перехода к более высоким уровням разрешения.

В алгоритме используется итеративный процесс для уточнения значений вектора потока, минимизируя разницу между интенсивностями в последовательных кадрах. Каждое уточнение основывается на использовании производных, что позволяет учитывать небольшие смещения. Чтобы минимизировать влияние шума применяются сглаживающие фильтры, что способствует стабилизации значений оптического потока и улучшению точности оценки.

Этот алгоритм позволяет получить плотное поле оптического потока, что делает его эффективным для задач анализа движения объектов, стабилизации видеопотока и отслеживания перемещений. Применение квадратичной аппроксимации и многоуровневого подхода позволяет достичь высокой точности и учитывать сложные движения.

Определение координат и привязка к карте

Для определения координат опор ВЛС используются несколько параметров: локализация основания опоры на изображении в пикселях (x, y) , ширина и высота изображения в пикселях (W_{image}, H_{image}) , ширина и высота сенсора камеры в мм (W_{sensor}, H_{sensor}) , фокусное расстояние камеры в мм (F) .

Система рассчитывает фокусное расстояние камеры в пикселях f_x и f_y для осей x и y , используя физические параметры камеры:

$$f_x = F \cdot \frac{W_{image}}{W_{sensor}},$$

$$f_y = F \cdot \frac{H_{image}}{H_{sensor}}.$$

Каждый кадр видео обрабатывается моделью YOLOv8-Pose, которая определяет координаты основания и вершины опоры ВЛС, а также граничную рамку (x_1, x_2, x_3, x_4) . Для определения координат используется только основание опоры ВЛС. Для каждого обнаруженного объекта его координаты на изображении (x, y) преобразуются в реальные координаты относительно координат камеры. Смещения (dx, dy) от центра изображения рассчитываются как:

$$dx = -\frac{(c_x - x)}{f_x}, \quad dy = -\frac{(c_y - y)}{f_y},$$

где (c_x) и (c_y) – координаты центра изображения. С учётом высоты БПЛА (h) , координаты в мировой системе от-

носительно камеры (X_{world}, Y_{world}) можно вычислить через глубину (расстояние до объекта):

$$X_{world} = dx \cdot h,$$

$$Y_{world} = dy \cdot h.$$

Здесь предполагается, что в связанной системе координат начальные значения крена, тангажа и рысканья БПЛА равны нулю и остаются неизменными в течение полета. Для получения координат в широте и долготе используется радиус Земли $R=6378137$ м. Смещения Δlat и Δlon объекта рассчитываются:

$$\Delta lat = \frac{Y_{world}}{R},$$

$$\Delta lon = \frac{X_{world}}{R \cdot \cos(lat_{drone})}.$$

Итоговые географические координаты объекта будут равны:

$$lat_{object} = lat_{drone} + \Delta lat,$$

$$lon_{object} = lon_{drone} + \Delta lon.$$

Межкадровое движение БПЛА определяется анализом оптического потока, который показывает среднее смещение по осям x и y , avg_flow_y и avg_flow_x :

$$\Delta lat_{drone} = \frac{avg_flow_y \cdot s_y}{R} \cdot \frac{180}{\pi},$$

$$\Delta lon_{drone} = \frac{avg_flow_x \cdot s_x}{R \cdot \cos(lat_{drone})} \cdot \frac{180}{\pi},$$

где s_x и s_y – размеры одного пикселя на сенсоре камеры по осям x и y . Эти величины используются для определения нового положения БПЛА.

Определение угла наклона опоры

Пусть известны высота полета БПЛА, фокусное расстояние камеры, высота столба и смещение верхушки столба на изображении. Необходимо определить угол наклона опоры ВЛС θ , зная следующие параметры: высота полета БПЛА над основанием столба – H_d ; высота столба – H_p ; фокусное расстояние камеры – f ; смещение верхушки столба на изображении относительно основания – s . БПЛА находится прямо над основанием опоры на высоте H_d .

Опора наклонена под углом θ относительно вертикали. Верхушка опоры смещается от основания на расстояние D :

$$D = H_p \sin(\theta).$$

Вертикальная высота верхушки опоры относительно основания:

$$Z_{top} = H_p \cos(\theta).$$

Расстояние от камеры до верхушки столба вдоль оси Z :

$$Z_{camera} = H_d - Z_{top} = H_d - H_p \cos(\theta).$$

Горизонтальное смещение верхушки столба относительно основания в плоскости XY :

$$X_{top} = D = H_p \sin(\theta).$$

Согласно принципам перспективной проекции, смещение объекта на изображении связано с его реальными координатами:

$$s = f \cdot \frac{X_{top}}{Z_{camera}} = f \cdot \frac{H_p \sin(\theta)}{H_d - H_p \cos(\theta)}.$$

Из равносильных преобразований можно заметить, что

$$sH_p \cos(\theta) + fH_p \sin(\theta) = sH_d.$$

Решая уравнение, получаем выражение для определения угла наклона столба ВЛС:

$$\theta = \arctan\left(\frac{f}{s}\right) \pm \arccos\left(\frac{sH_d}{H_p \sqrt{s^2 + f^2}}\right). \quad (1)$$

Таким образом, общий алгоритм для определения наклона опор ВЛС для набора изображений:

1. Автоматическая обработка каждого изображения из набора данных;
2. Применение нейронной сети для получения координат и расчёта смещения s .
3. Перевод смещения в реальное расстояние – использование формулы реальное смещение (в метрах) объекта в пространстве, учитывая параметры камеры.
4. Расчёт угла наклона – подстановка данных в формулу угла θ и перевод результатов из радиан в градусы.

Результаты и их обсуждение

Для обучения модели использовался набор данных из 686 исходных изображений. Для повышения обобщающей способности модели изображения были аугментированы, с увеличением размера набора данных до 1494 изображений. Аугментация позволяет значительно увеличить объем обучающей выборки, а также позволить модели более эффективно научиться обобщению на данных. Среди использованных методов аугментации были применены:

- Изменение оттенка изображения (от -17° до $+17^\circ$);

- Изменение насыщенности изображения (От -31% до +31%);
- Изменение яркости изображения (От -15% до +15%);
- Изменение экспозиции изображения (От -5% до +5%);
- Размытие изображения (до 0,8px);
- Добавление шума (0,22%).

Для каждой опоры на изображении была выделена ограничивающая рамка, а также две ключевые точки (рис. 2).

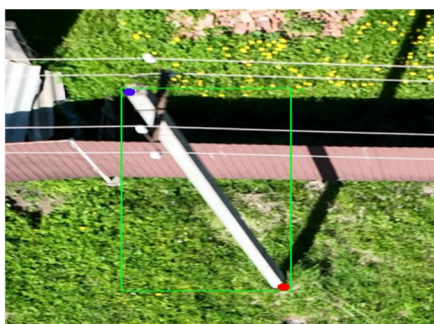


Рис. 2. Пример предсказания модели YOLOv8-Pose

Fig. 2. Example of YOLOv8-Pose model prediction

Состав итогового набора данных приведен в табл. 1.

Таблица 1. Размеры датасетов

Table 1. Dataset sizes

Размер тренировочного набора данных	1308 изображений
Размер валидационного набора данных	124 изображений
Размер тестового набора данных	62 изображений

Графики обучения представлены на рис. 3. Модели демонстрируют ее способность адаптироваться к данным и применять полученные знания в различных ситуациях. Графики разделены на две группы: метрики потерь на тренировочной выборке (верхняя строка) и на валидационной выборке (нижняя строка).

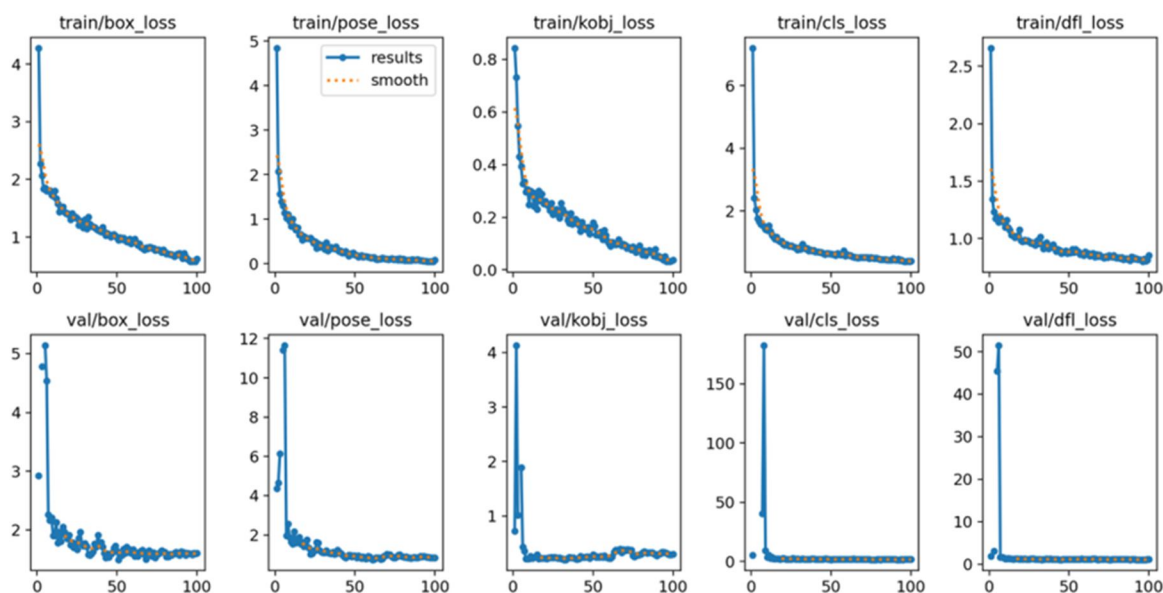


Рис. 3. Графики обучения модели

Fig. 3. Model training schedules

По результатам обучения, точность по метрике mean Average Precision (mAP) 0,71 для детекции опор, что свидетельствует о необходимости дополнительного обучения модели на более обширном наборе данных. На данный момент этот недостаток компенсируется применением метода кластеризации и его усредняющей функции.

Vox_loss и характеризует качество предсказания координат ограничивающих рамок. Потери на тренировочной выборке демонстрируют плавное снижение, что свидетельствует об успешном обучении модели в отношении локализации объектов. На валидационной выборке также наблюдается уменьшение значений потерь. $Pose_loss$ описывает качество предсказания позы (в частности, вершины и основания). На тренировочной выборке потери постепенно уменьшаются, что указывает на улучшение точности. На валидационной выборке в начале обучения видны скачки, которые позже стабилизируются, что может быть связано с процессом адаптации модели. $Kobj_loss$ оценивает качество предсказания вероятности наличия объекта в ограничивающей рамке. Потери на тренировочной выборке снижаются плавно, демонстрируя устойчивую сходимость. На валидационной выборке наблюдается резкий спад значений в начальных эпохах обучения, после чего потери стабилизируются. Cls_loss – потери, связанные с классификацией объектов внутри рамок. На тренировочной выборке график де-

монстрирует стабильное снижение значений, в то время как на валидационной выборке наблюдается резкое снижение в начальной фазе обучения, что может быть вызвано переобучением или изменением параметров модели. Dfl_loss отражает потери, связанные с точностью предсказания вероятностного распределения локализаций. На тренировочной выборке наблюдается плавное снижение значений потерь, а на валидационной выборке, как и в предыдущих метриках, отмечается резкий спад в начале обучения. После обучения была создана матрица ошибок (рис. 4).

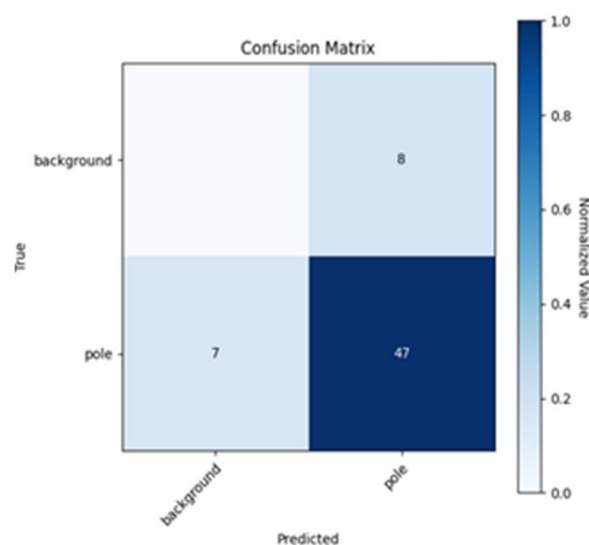


Рис. 4. Матрица ошибок

Fig. 4. Error matrix

Построение матрицы осуществлялось следующим образом: для опор, которые модель детектирует корректно $IoU \geq 0,75$, определяется как истинно положительное предсказание для класса *Pole*. Если модель ошибочно принимает фон за опору, это классифицируется как ложноположительное предсказание для *Pole* и

False Negative (ложноотрицательное) для *background*. Аналогично, если модель не распознаёт существующую опору, это считается ложно отрицательным для *Pole* и ложно положительным для *Background*. Для точности детекции вершины опоры и основания использовалась метрика F1-score. Были выбраны опоры ВЛС, предсказанные моделью корректно. Для ключевых точек рассчитывались показатели *Precision* и *Recall*, как и для задачи классификации. Если точка предсказывалась корректно, то добавлялся +1 к *TruePositive* и *TrueNegative*. В случае ошибки модели при определении точек основания и вершины, то *FalsePositiv* и *FalsePositive*.

Таким образом, точность детекции ключевых точек равна по метрике mAP 0,71. Это значение формируется за счет того, что нейронная сеть может некорректно предсказывать опоры ВЛС и, как следствие, неправильно детектировать точки. В пределах корректно предсказанной опоры точность детекции ее вершины и основания составляет 0,88 по метрике F1-score.

Расчет угла наклона столба ВЛС

Основной задачей является вычисление угла наклона столба, который можно определить с помощью геометрических формул, используя угол зрения камеры и ее положение относительно столба.

Входные данные для определения угла наклона столба: высота опоры, фокусное расстояние камеры высота поле-

та БПЛА. Формула (1) позволяет рассчитать угол наклона θ через параметры камеры, высоту БПЛА, высоту опоры и смещение s . Из изображений после применения нейронной сети получены данные о расположении ключевых точек, из которых была рассчитана величина s – смещение верхушки опоры на изображении относительно основания в пикселях.

Для определения угла наклона было взято 320 изображений. С использованием выведенной формулы для определения наклона столба ВЛС были рассчитаны их углы. В табл. 2 приведены рассчитанные результаты для 5 случайных изображений из набора данных.

Таблица 2. Результаты определения угла наклона

Table 2. The results of the tilt angle determination

θ (градусы) / θ degrees)	s (пиксели) / s (pixels)	H (м) / H (m)
5,81	78,32	35,0
4,21	32,67	30,0
2,99	2,41	32,5
3,51	11,22	34,0
1,8	56,7	3,5

Максимальный наклон столба составил $24,5^\circ$, а минимальный – $0,6^\circ$. Средний угол наклона опор для всего набора изображений составляет примерно $6,1^\circ$.

Выводы

Анализ современных подходов к мониторингу состояния воздушных линий связи выявил актуальность проблемы

обеспечения точности и автоматизации процесса. В работе предложен метод для определения наклона опор ВЛС, отличающийся применением YOLOv8-Pose для детекции ключевых точек и алгоритма оптического потока для повышения точности оценки межкадрового перемещения БПЛА. Метод обеспечивает автоматическое определение координат опор и их угла наклона на основе аэрофото-

снимков. Для расчетов была выведена формула, связывающая параметры камеры, высоту полета и смещение вершины опоры. Экспериментальные результаты продемонстрировали высокую эффективность метода. Точность детекции ключевых точек опор достигла 0,88 по метрике F1-score. Средний угол наклона опор для всего набора изображений составил примерно 6,1°.

Список литературы

1. Астапова М.А., Уздяев М.Ю. Детектирование дефектов неисправных элементов линий электропередач при помощи нейронных сетей семейства YOLO // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021; 9(4): 35.
2. Паньков Д.Н., Бугорский И.А. Применение искусственного интеллекта для обнаружения дефектов воздушных линий электропередач // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. 2023; 282–285.
3. Fang Z., Savkin A.V. Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review // Drones. 2024; 8(5): 193.
4. Epifani L, Caruso A. A Survey on Deep Learning in UAV Imagery for Precision Agriculture and Wild Flora Monitoring: Datasets, Models and Challenges // Smart Agricultural Technology. 2024; 100625.
5. Overview of Large Scale Map Production with UAV-Based Photogrammetric Technique: A Case Study in Izmir-Cesme Territory of Turkey / Y. Yılmaz, M. Gürtürk, B. Süleymanoğlu, A. Soycan, M. Soycan // Journal of Geography and Cartography. 2023; 6(2): 2164.
6. A UAV Intelligent System for Greek Power Lines Monitoring / A. Tsellou, G. Livanos, D. Ramnalis, V. Polychronos, G. Plokamakis, M. Zervakis, K. Moirogiorgou // Sensors. 2023; 23(20): 8441.
7. Bellou E., Pisica I., Banitsas K. Aerial Inspection of High-Voltage Power Lines Using YOLOv8 Real-Time Object Detector // Energies. 2024; 17(11): 2535.
8. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling: Current Status and Future Perspectives / F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. Sarazzi // Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g). 2011; 25–31.

9. Bhowmick S., Nagarajaiah S., Veeraraghavan A. Vision and Deep Learning-Based Algorithms to Detect and Quantify Cracks on Concrete Surfaces from UAV Videos // *Sensors*. 2020; 20(21): 6299.
10. Automatic Measurement of Inclination Angle of Utility Poles Using 2D Image and 3D Point Cloud / L. Chen, J. Chang, J. Xu, Z. Yang // *Applied Sciences*. 2023; 13(3): 1688.
11. Automatic Assessment and Prediction of the Resilience of Utility Poles Using Unmanned Aerial Vehicles and Computer Vision Techniques / M.M. Alam, Z. Zhu, B. Eren Tokgoz, J. Zhang, S. Hwang // *International Journal of Disaster Risk Science*. 2020; 11: 119–132.
12. PTTE: Power Tower Tilt Estimation Algorithm Based on LiDAR Point Cloud / F. Chen, Y. Li, F. Shuang, M. Huang // *2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. IEEE. 2023; 309–315.
13. Алгоритм определения наклона опор ЛЭП методами глубокого обучения по видеоданным / О.В. Лимановская, Е.А. Титов, Д.И. Волкова, А.В. Лемех // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2020; (2): 72–80.
14. NB-IoT Based Method for Monitoring the Tilt Status of Transmission Towers. *Journal of Physics* / Y. Zheng, Y. Wu, J. Gao, S. Cui // *Conference Series*. IOP Publishing. 2021; 2108(1): 012033.
15. A Transmission Tower Tilt State Assessment Approach Based on Dense Point Cloud from UAV-Based LiDAR / Z. Lu, H. Gong, Q. Jin, Q. Hu, S. Wang // *Remote Sensing*. 2022; 14(2): 408.
16. Automatic Utility Pole Inclination Angle Measurement Using Unmanned Aerial Vehicle and Deep Learning / Z. Zhu, J. Zhang, M.M. Alam, B.E. Tokgoz, S. Hwang // *Proceedings of the Institute of Industrial and Systems Engineers Annual Conference*. 2019.
17. Sun L., et al. Power Tower Tilt Monitoring Method Based on Beidou and Improved YOLOv3. *AIoTC*. 2022; 58–66.
18. Yue K. Multi-Sensor Data Fusion for Autonomous Flight of Unmanned Aerial Vehicles in Complex Flight Environments // *Drone Systems and Applications*. 2024; 12: 1–12.
19. Power Transmission Lines Foreign Object Intrusion Detection Method for Drone Aerial Images Based on Improved YOLOv8 Network / H. Sun, Q. Shen, H. Ke, Z. Duan, X. Tang // *Drones*. 2024; 8(8): 346.
20. An Improved YOLOv8 Network for Detecting Electric Pylons Based on Optical Satellite Image / X. Chi, Y. Sun, Y. Zhao, D. Lu, Y. Gao, Y. Zhang // *Sensors*. 2024; 24(12): 4012.
21. YOLO-Pose: Enhancing YOLO for Multi-Person Pose Estimation Using Object Keypoint Similarity Loss / D. Maji, S. Nagori, M. Mathew, D. Poddar // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2022; 2637–2646.

22. Farnebäck G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // Image Analysis: 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29–July 2, 2003 Proceedings 13. Springer Berlin Heidelberg. 2003; 363–370.

References

1. Astapova M.A., Uzdaev M.Yu. Detection of defects in faulty elements of power lines using YOLO neural networks. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2021; 9(4): 35. (In Russ.).

2. Pankov D.N., Bugorskiy I.A. Application of artificial intelligence for defect detection in overhead power lines. *Perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii = Perspectives of development of technologies for processing and equipment in mechanical engineering*. 2023; 282–285. (In Russ.).

3. Fang Z., Savkin A.V. Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review. *Drones*. 2024; 8(5): 193.

4. Epifani L., Caruso A. A Survey on Deep Learning in UAV Imagery for Precision Agriculture and Wild Flora Monitoring: Datasets, Models and Challenges. *Smart Agricultural Technology*. 2024; 100625.

5. Yılmaz Y., Gürtürk M., Süleymanoğlu B., Soycan A., Soycan M. Overview of Large Scale Map Production with UAV-Based Photogrammetric Technique: A Case Study in Izmir-Cesme Territory of Turkey. *Journal of Geography and Cartography*. 2023; 6(2): 2164.

6. Tsellou A., Livanos G., Ramnalis D., Polychronos V., Plokamakis G., Zervakis M., Moirogiorgou K. A UAV Intelligent System for Greek Power Lines Monitoring. *Sensors*. 2023; 23(20): 8441.

7. Bellou E., Pisica I., Banitsas K. Aerial Inspection of High-Voltage Power Lines Using YOLOv8 Real-Time Object Detector. *Energies*. 2024; 17(11): 2535.

8. Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling: Current Status and Future Perspectives. *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*. 2011; 25–31.

9. Bhowmick S., Nagarajaiah S., Veeraraghavan A. Vision and Deep Learning-Based Algorithms to Detect and Quantify Cracks on Concrete Surfaces from UAV Videos. *Sensors*. 2020; 20(21): 6299.

10. Chen L., Chang J., Xu J., Yang Z. Automatic Measurement of Inclination Angle of Utility Poles Using 2D Image and 3D Point Cloud. *Applied Sciences*. 2023; 13(3): 1688.

11. Alam M.M., Zhu Z., Eren Tokgoz B., Zhang J., Hwang S. Automatic Assessment and Prediction of the Resilience of Utility Poles Using Unmanned Aerial Vehicles and Computer Vision Techniques. *International Journal of Disaster Risk Science*. 2020; 11: 119–132.
12. Chen F., Li Y., Shuang F., Huang M. PTTE: Power Tower Tilt Estimation Algorithm Based on LiDAR Point Cloud. *2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. IEEE. 2023; 309–315.
13. Limanovskaya O.V., Titov E.A., Volkova D.I., Lemeh A.V. Algorithm for determining the inclination of power line supports using deep learning methods on video data. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of Ivanovo State Power University*. 2020; (2): 72–80. (In Russ.).
14. Zheng Y., Wu Y., Gao J., Cui S. NB-IoT Based Method for Monitoring the Tilt Status of Transmission Towers. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2021; 2108(1): 012033.
15. Lu Z., Gong H., Jin Q., Hu Q., Wang S. A Transmission Tower Tilt State Assessment Approach Based on Dense Point Cloud from UAV-Based LiDAR. *Remote Sensing*. 2022; 14(2): 408.
16. Zhu Z., Zhang J., Alam M.M., Tokgoz B.E., Hwang S. Automatic Utility Pole Inclination Angle Measurement Using Unmanned Aerial Vehicle and Deep Learning. *Proceedings of the Institute of Industrial and Systems Engineers Annual Conference*. 2019.
17. Sun L., Ma C., Hu H., Ni T., Zhang M., Zhang Z. Power Tower Tilt Monitoring Method Based on Beidou and Improved YOLOv3. *AIoTC*. 2022; 58–66.
18. Yue K. Multi-Sensor Data Fusion for Autonomous Flight of Unmanned Aerial Vehicles in Complex Flight Environments. *Drone Systems and Applications*. 2024; 12: 1–12.
19. Sun H., Shen Q., Ke H., Duan Z., Tang X. Power Transmission Lines Foreign Object Intrusion Detection Method for Drone Aerial Images Based on Improved YOLOv8 Network. *Drones*. 2024; 8(8): 346.
20. Chi X., Sun Y., Zhao Y., Lu D., Gao Y., Zhang Y. An Improved YOLOv8 Network for Detecting Electric Pylons Based on Optical Satellite Image. *Sensors*. 2024; 24(12): 4012.
21. Maji D., Nagori S., Mathew M., Poddar D. YOLO-Pose: Enhancing YOLO for Multi-Person Pose Estimation Using Object Keypoint Similarity Loss. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2022; 2637–2646.
22. Farnebäck G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. In: *Image Analysis: 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29–July 2, 2003 Proceedings 13. Springer Berlin Heidelberg*. 2003; 363–370.

Информация об авторах / Information about the Authors

Заикин Михаил Игоревич, ведущий программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zmaik@live.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8149-5804>.

Астапова Марина Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: astapova.m@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9121-894X>

Волков Данила Михайлович, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: volkov.d@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-5030-677X>

Mikhail I. Zaikin, Lead Programmer of the Autonomous Robotic Systems Laboratory, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: zmaik@live.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8149-5804>

Marina A. Astapova, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, 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, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: astapova.m@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9121-894X>

Danila M. Volkov, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, 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, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: volkov.d@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-5030-677X>

УДК 004.896

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-27-39>



Проблемы искусственного интеллекта в строительстве

С.М. Чекардовский¹, И.А. Чекардовская¹, А.П. Бурцев² ✉

¹ Тюменский индустриальный университет
ул. Мельникайте, д. 70, г. Тюмень 625027, Российская Федерация

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

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В исследовании представлены ключевые аспекты внедрения и использования искусственного интеллекта (ИИ) в строительной отрасли. Обсуждаются вызовы, с которыми сталкиваются строители при внедрении ИИ, такие как высокая стоимость оборудования и необходимость переподготовки кадров. Также рассматриваются преимущества ИИ, включая повышение эффективности проектирования, снижение издержек и улучшение контроля над строительными процессами. Особое внимание уделяется применению ИИ в мониторинге строительных объектов, прогнозировании рисков, автоматизации типовых операций и использовании автономной техники. Статья подчеркивает, что несмотря на существующие проблемы, ИИ представляет собой мощный инструмент для трансформации строительной индустрии, способный значительно улучшить качество и скорость строительства.

Методы. В исследовании применены методы статистического и сравнительного анализов, метод «золотого квадрата» в условиях цифровизации СК, ориентированного на управление сложными ситуациями.

Результаты. Разработан классификатор угроз и рисков для СК в условиях сложных ситуаций с точки зрения устойчивого развития искусственного интеллекта в строительной отрасли.

Заключение. Искусственный интеллект в строительстве открывает новые горизонты для повышения эффективности и оптимизации процессов. От BIM-технологий до автономных роботов и дронов, ИИ становится неотъемлемой частью современной строительной индустрии. Однако, несмотря на все преимущества, существуют и вызовы, такие как высокая стоимость оборудования и необходимость переподготовки кадров. Тем не менее, потенциал ИИ в строительстве огромен, и его внедрение обещает значительные улучшения в качестве, скорости и безопасности строительных работ. В работе приведен обзор проблем СК в современных условиях. Представлен анализ применения метода «золотого квадрата» в условиях цифровизации СК, ориентированного на управление сложными ситуациями. Разработан классификатор угроз и рисков для СК в условиях сложных ситуаций с точки зрения устойчивого развития.

Ключевые слова: строительная отрасль; искусственный интеллект; внедрение; затраты; эффективность; строительный процесс; мониторинг; автоматизация; трансформация.

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

Для цитирования: Чекардовский С.М., Чекардовская И.А., Бурцев А.П. Проблемы искусственного интеллекта в строительстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 27-39. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-27-39>.

Поступила в редакцию 16.01.2025

Подписана в печать 04.02.2025

Опубликована 14.04.2025

Problems of artificial intelligence in construction

Sergey M. Chekardovsky ¹, Irina A. Chekardovskaya ¹, Alexey P. Burtsev ² ✉

¹ Tyumen Industrial University
70, Melnikaite str., Tyumen 625027, Russian Federation

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

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose. The study presents the key aspects of the introduction and use of artificial intelligence (AI) in the construction industry. The challenges faced by builders when implementing AI, such as the high cost of equipment and the need for retraining, are discussed. The advantages of AI are also considered, including improving design efficiency, reducing costs and improving control over construction processes. Special attention is paid to the use of AI in monitoring construction sites, risk forecasting, automation of typical operations and the use of autonomous technology. The article emphasizes that despite the existing problems, it is a powerful tool for the transformation of the construction industry, which can significantly improve the quality and speed of construction.

Methods. The research uses methods of statistical and comparative analysis, the «golden square» method in the context of digitalization of the IC, focused on managing complex situations.

Results. A classifier of threats and risks for IC in difficult situations has been developed from the point of view of the sustainable development of artificial intelligence in the construction industry.

Conclusion. Artificial intelligence in construction opens up new horizons for improving efficiency and optimizing processes. From BIM technologies to autonomous robots and drones, and is becoming an integral part of the modern construction industry. However, despite all the advantages, there are also challenges, such as the high cost of equipment and the need for retraining. Nevertheless, the potential in construction is huge, and its implementation promises significant improvements in the quality, speed and safety of construction work. The paper provides an overview of the problems of IC in modern conditions. The analysis of the application of the "golden square" method in the context of digitalization of the IC, focused on managing complex situations, is presented. A classifier of threats and risks for the UK in difficult situations from the point of view of sustainable development has been developed.

Keywords: construction industry; artificial intelligence; implementation; costs; efficiency; construction process; monitoring; automation; transformation.

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

For citation: Chekardovsky S. M., Chekardovskaya I. A., Burtsev A. P. Problems of artificial intelligence in construction. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 27-39 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-27-39>.

Received 16.01.2025

Accepted 04.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

Если рассматривать искусственный интеллект как развивающуюся систему с обязательным многоуровневым процессом, можно предположить успешность в достижении целей в строительстве. Предположительно через 120 лет все рабочие места будут автоматизированы. Звучит как фантастика, если выполнять основную из задач – повышение уровня строительства и людей, которые в нем работают [1, 2].

Директор Института Искусственного Интеллекта Леонид Жуков утверждает, что уровень предприятия в этом случае должен быть высоко технологичным. Нехватка специалистов в этой области только подстегивает спрос, который вырос на 74% за 2016 - 2019 годы на образовательные услуги.

Данное обстоятельство совершенно по-новому ставит вопрос о национальной безопасности, и более явно прослеживается акцент на элементы войны: политической, экономической информационной. При этом рассматривается сознание человека и его мировоззрение как инструменты военных действий.

Нейросеть ChatGPT4 (март 2023 года) поражает воображение своей недостижимостью. Способность общения, многоязычный перевод, создание кодов и т.д. не умоляет того обстоятельства что это происходит во время специальной военной операции и остро ставит вопрос о международной безопасности. В обла-

сти разработки новых технологий искусственный интеллект уже сейчас меняет общую среду, укрепляя технологическое преимущество в условиях войны: политической, экономической, военной и информационной. На сознание человека и его мировоззрение – это может действовать как поражающий фактор.

Трудно не заметить эйфорию от разработанных и уже внедренных в производство экспертных систем, программных средств, интеллектуального анализа (нейронные сети). Но проблема заключается в том, что, охватывая большие массивы данных, эти средства не обладают моделями поведения и планирования.

Увеличение эффективности производственных процессов на основе применения цифровых технологий сегодня становится первостепенной задачей на производстве и рассматривается в условиях четвертой промышленной революции как основное условие для нефтегазовой отрасли. В этом случае предлагается решение следующих задач (рис. 1).

Продвижение науки и искусства в сторону бурного развития отражает современную жизнь. Даже само понятие искусственного интеллекта рождает новое ощущение живого, но пока опасного творения человека.

Мир знаков расширяет информационное поле, эволюционируя все же приходит к человеческому мозгу. Скорость эволюции и развитие информационного мира не пугает только некомпетентных

людей и может предопределить для человечества не лучший исход.

Материалы и методы

Цифровизация выбрана государством как одно из приоритетных направлений развития отраслей и предприятий с учетом эффективности цифровой трансформации.

В результате применения общенаучных методов на предприятиях нефтегазовой отрасли (анализ, синтез, кон-

кретизация, экспертные оценки, метод «Золотой квадрат») доказана их эффективность для применения в строительстве [1-15].

В предложенном методе «Золотой квадрат» по решению задач управления промышленным предприятием в условиях цифровой трансформации был предусмотрен способ исключения угроз и рисков для устойчивого развития промышленного предприятия.

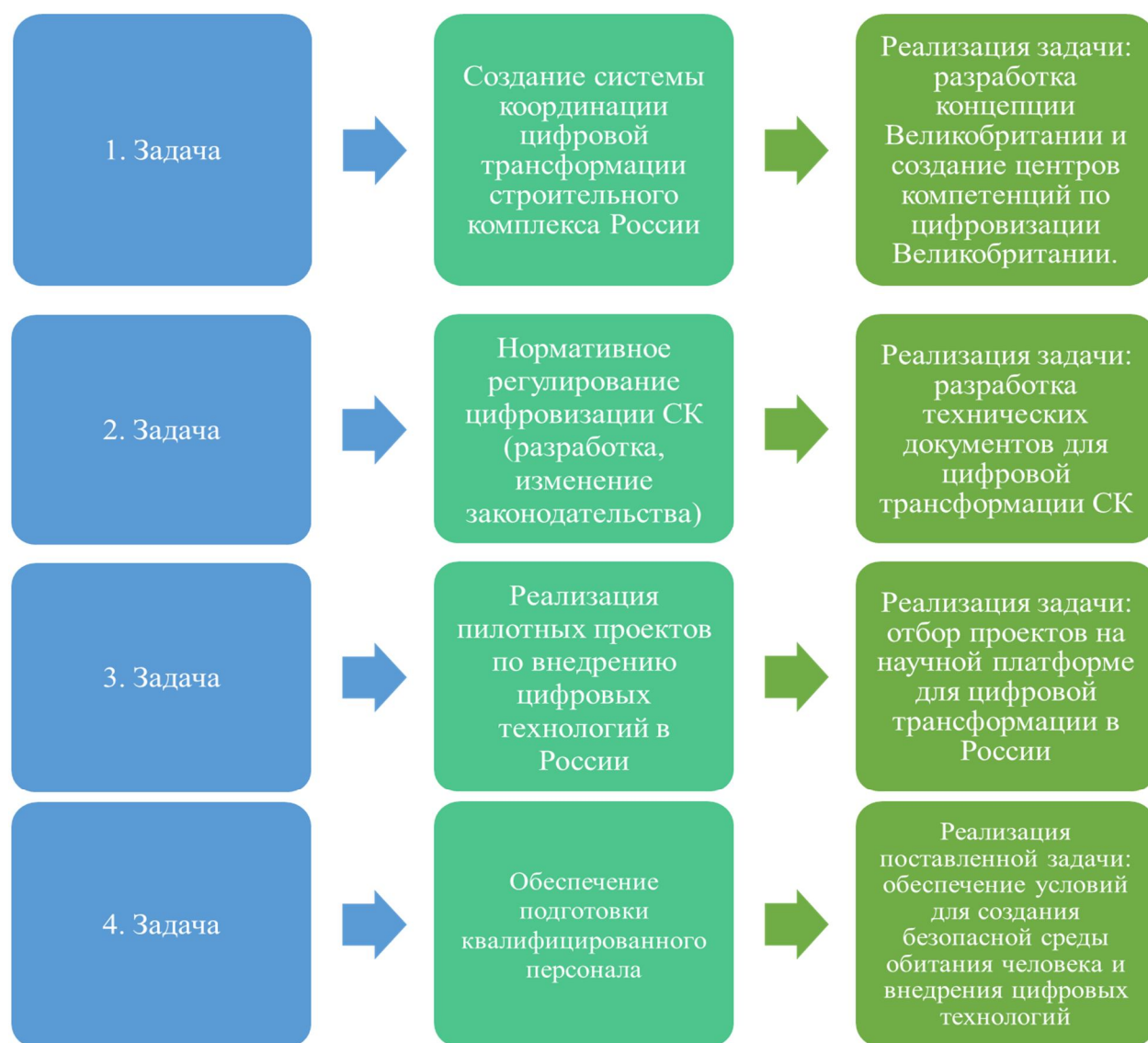


Рис. 1. Решение необходимых задач

Fig. 1. Solving the necessary tasks

Этот метод позволит в дальнейшем объективно рассматривать процесс ситуационного управления строительным комплексом (СК) и адаптировать разработанный инструментарий в соответствии с выявленными особенностями бизнес-процессов.

Задачи:

1. Описание проблем СК в современных условиях.

2. Анализ применения метода «золотого квадрата» в условиях цифровизации СК, ориентированного на управление сложными ситуациями.

3. Разработка классификатора угроз и рисков для СК в условиях сложных ситуаций с точки зрения устойчивого развития (табл. 1).

Строительный комплекс, реализуя стратегию цифровизации, еще не вполне соответствует уровню цифровой зрелости. Как выяснил автор статьи, главной проблемой цифровой трансформации остается не понимание того, что сама по себе стратегия не может обеспечить устойчивость строительной компании на перспективу [2-11].

Таблица 1. Кризисный классификатор угроз в строительстве [2]

Table 1. Crisis classifier of threats in construction [2]

Признак / Sign	Угроза / Threat	Описание угрозы / Description of threat	Человеческий фактор / Human factor	
Источник возникновения угрозы	Внешние	Гибкость закона в области цифровых технологий, кибератаки	Обслуживание системы	Нарушитель
	Внутренние	Ошибки, злоупотребления, раскрытие конфиденциальной информации, низкое качество работы	Современное оборудование	Старое оборудование
Природа возникновения угрозы	Объективные	Трудные климатические условия, истощение ресурсов, тупиковые варианты развития (незрелые цифровые технологии)	Неправильные решения	Правильные решения (не выполнимые из-за климатических условий)
	Субъективные	Искажение, кража информации, изменение компетенций персонала и увеличение ошибок	Отсутствие профессиональных умений в области цифровых технологий	Высокие профессиональные навыки в области цифровых технологий
	Смешанные	Значительный объем информационного мусора	Отсутствие возможности моментального реагирования на способность системы порождать информационный поток	Способность системы порождать информационный мусор

Окончание табл. 1 / Ending of table 1

Признак / Sign	Угроза / Threat	Описание угрозы / Description of threat	Человеческий фактор / Human factor	
Время воздей- ствия	Краткосроч- ные	Аварийные случаи	Продления времени аварийной ситуации. Сокращение времени на ликвидацию аварии	Продление времени аварийной ситуации
	Среднесроч- ные	Не соответствие пла- нового и фактическо- го строительства	Различные виды не соответствий строительства	Задачи разрушения системы
	Долгосроч- ные	Финансовые потери от безграмотной экс- плуатации цифровых технологий	Различные задачи финансистов и обслуживающего персонала системы	Задачи разрушения системы

И вероятнее всего необходимо понимание происходящего технологического и цифрового процессов, а таких специалистов на предприятии, к сожалению, не так много. Стандартизация и унификация контроля и диагностики в строительстве с использованием риск-ориентированного подхода может решать ряд проблем фальсификации экспертиз промышленной безопасности.

Результаты и их обсуждение

Для решения системных проблем по причине износа фондов оборудования, отсутствия средств на разработку методов и средств диагностирования, отсутствия своевременных предложений по планированию и реализации эффективных мероприятий ставят в ряд приоритетных комплексную программу развития единого информационного пространства для строительного комплекса. Например, по данным ГазТехЭксперт, ежегодный эффект в России от внедрения

программы «Индустрия 4.0» в 2025 году может составить до 4,1 трлн. руб. На рис. 2 с поправкой на долю ВВП России показан расчетный эффект в общем ВВП развивающихся стран¹.

Стремление человека научиться управлять хаотическими системами идет от внутреннего желания управлять своими познавательными возможностями. С позиции методологического сознания и обретения методологического знания исследователь формирует собственное сознание. И оно у каждого человека индивидуально и субъективно. В основном обработка научных методов осуществляется на основе личного, группового и исторического опыта.

Различие между методологическим сознанием и методологией науки еще раз доказывает не только логичность в рассуждениях, но и стихийность и неосозна-

¹ Трофимов С. В. Методы ситуационного управления промышленным предприятием: дис. ... канд. экон. наук. М., 2012. 143 с.

ваемость процессов (интуитивный уровень). Объективное представление в структуре связей методологии науки лишь отдаленно согласуются с какой-либо теоретической системой. И сами структуры

научного познания ученые (Макиенко М.А., Черниговская Т.В.). связывают с общими моделями культурологического освоения реальности.

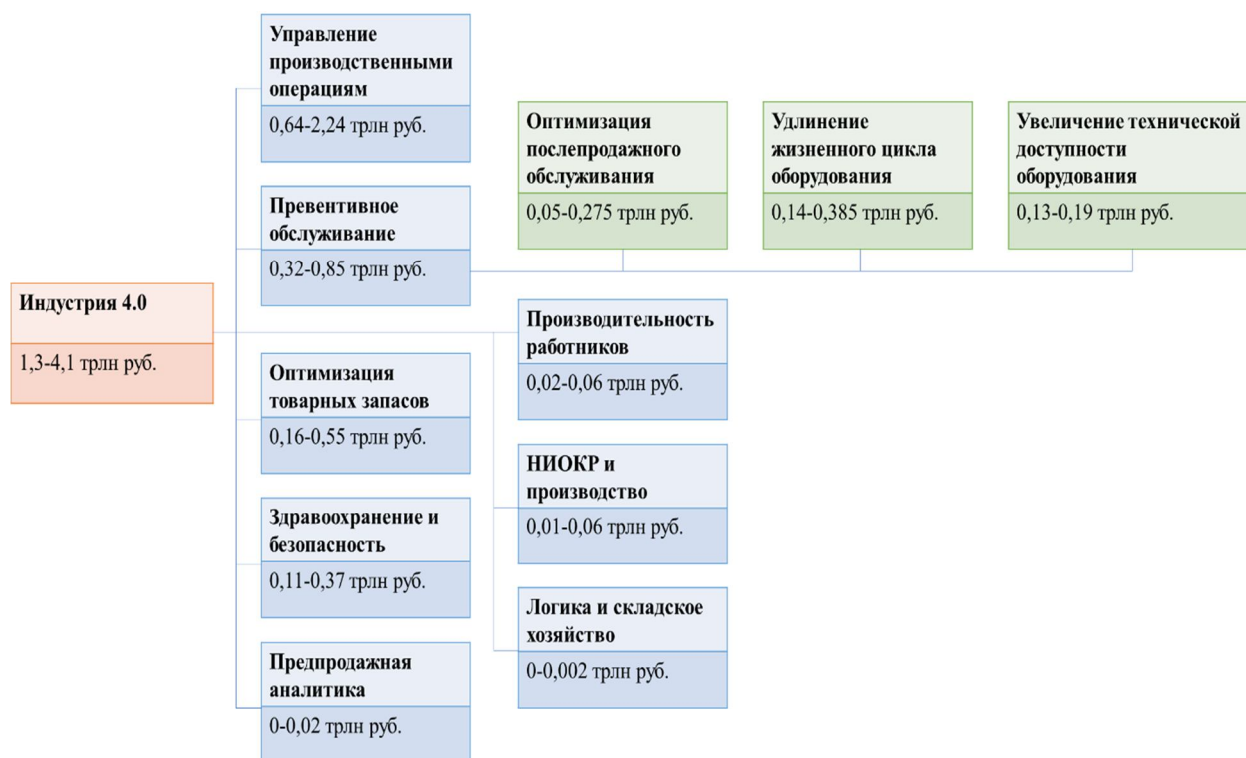


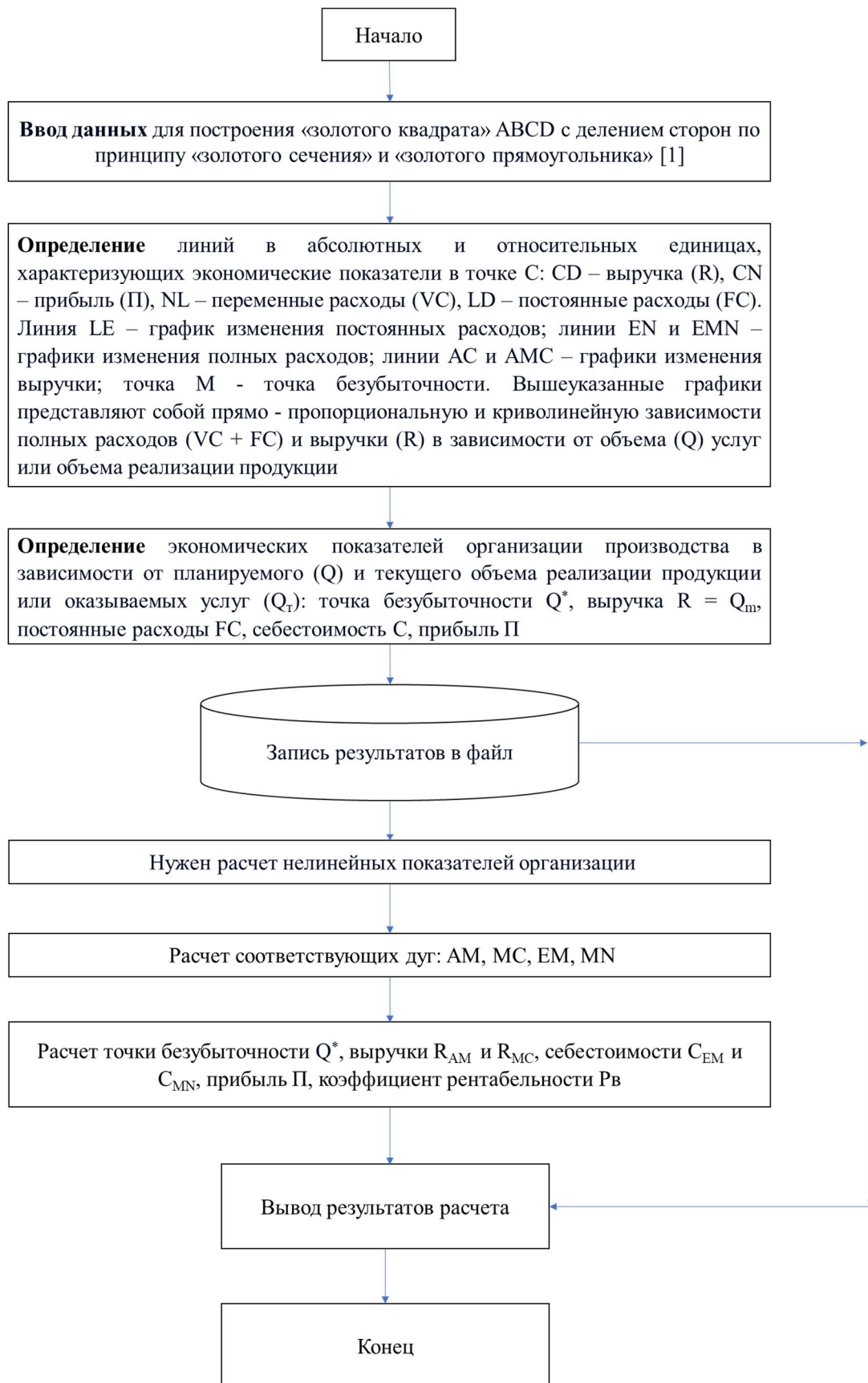
Рис. 2. Ежегодный эффект от внедрения программы «Индустрия 4.0»

Fig. 2. The annual effect of the implementation of the «Industry 4.0»

Погружение в современные проблемы науки сознания и методологии науки лишь может сориентировать познавательную деятельность в направлении научности. Ум (интеллект) как категория относительная в разные периоды человечества существует лишь до того периода, пока существуют разработанные критериальные оценки. Смена периода влечет за собой новый взгляд на происходящее и новую критериальную оценку. Внутри метода «Золотой квадрат» заложена категория «чувствительности», которая реа-

гирует на изменение условий внешней среды, что делает ее более приоритетной по сравнению с другими (для различных периодов). Используем для этого принцип «золотого сечения» отрезка и «золотого прямоугольника»¹ для построения «Золотого квадрата» (рис. 3) с делением сторон по принципу «золотого сечения».

¹ Чекардовская И. А. Оценка эффективности организации технического обслуживания и ремонта оборудования компрессорных станций: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2009. 140 с.

**Рис. 4.** Блок-схема для построения «золотого квадрата»**Fig. 4.** Flowchart for the construction of the "golden square"

Список литературы

1. Чекардовская И. А., Чекардовский М. Н. Золотой квадрат. Методика определения экономических показателей нефтегазотранспортного // Деловой журнал *Neftegaz.RU*. 2015. № 11-12(47-48). С. 72-77.
2. Жизненный цикл энергии. Энергетический менеджмент и принятие оптимальных решений / Н. П. Ширяева, А. В. Гришкова, А. Ю. Морозов [и др.]. Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2014. 190 с.
3. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
4. The comparative analysis of the calculation methods of heat exchange efficiency in frame-panel housing construction / M. N. Chekardovskiy, T. S. Zhilina, I. Y. Shalagin, V. V. Mironov // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9, no. 6. P. 40-47.
5. Chekardovskiy M. N., Chekardovskiy S. M., Chekardovskaya I. A. Evaluation development method of production efficiency level // *Asia Life Sciences*. 2019. No. 1 Suppl. 21. P. 527-538.
6. Methodology of application of open-source platform Protégé in the measurement and computing systems development for diagnostics of heat supply networks / A. Petrov, A. Popov, A. Pushkarev, M. Chekardovsky // *CEUR Workshop Proceedings*. Moscow, 2021.
7. Research of Spined Heat-Exchanging Pipes / K. Akulov, V. Golik, M. Chekardovsky, A. Serebrennikov // *XV International Conference «Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016»*, 11 August 2016. Les Ulis: EDP Sciences–France, 2016. Vol. 73. P. 01027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301027>.
8. Upgraded Algorithm for Calculating the Turbo-Expander of Gas Distribution Stations / M. Chekardovskiy, S. Chekardovskiy, K. Ilyukhin, A. Gladenko // *XV International Conference «Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016»*, 11 August 2016. Les Ulis: EDP Sciences–France, 2016. Vol. 73. P. 01020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301020>.
9. Research on Thermodynamic Parameters of a Micro-Turbine for Standalone Cogeneration / M. N. Chekardovskiy, S. M. Chekardovskiy, I. A. Chekardovskaya, A. I. Mihajlenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Tyumen, 20–25 мая 2016 года. Vol. 154. Tyumen: Institute of Physics Publishing, 2016. P. 012005. DOI 10.1088/1757-899X/154/1/012005.
10. A Frequency Model of Vibrational Processes in Gas-Turbine Drives of Compressor Stations of Main Gas Pipelines / M. N. Chekardovskiy, S. M. Chekardovskiy, A. A. Razboynikov, T. G. Ponomareva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,

Tyumen, 20–25 мая 2016 года. Vol. 154. Tyumen: Institute of Physics Publishing, 2016. P. 012023. DOI 10.1088/1757-899X/154/1/012023.

11. Chekardovskiy M. N., Chekardovskiy S. M., Ilyukhin K. N. Methods for Determining the Thermodynamic Parameters of Gas Compressor Units of Gas Pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tyumen, 20–25 мая 2016 года. Vol. 154. Tyumen: Institute of Physics Publishing, 2016. P. 012027. DOI 10.1088/1757-899X/154/1/012027.

12. Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

13. Бурцев А. П., Булгаков А. В., Яковлева В. Н. Вариант управления воздушными потоками по схеме «умный дом» с использованием комплексного многослойного пластинчатого рекуператора // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 7(1067). С. 60-63.

14. Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.

15. Experimental research of main characteristics in a complex multi-layer plate heat exchanger / V. S. Yezhov, N. E. Semicheva, A. P. Burtsev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1242, no. 1. P. 012042. DOI 10.1088/1757-899X/1242/1/012042.

References

1. Chekardovskaya I. A., Chekardovsky M. N. Golden Square. Methodology for determining quantitative indicators of non-gas transfer production. *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU = Business Magazine Neftegaz.RU*. 2015; (11-12): 72-77. (In Russ.).

2. Shiryayeva N. P., Grishkova A.V., Morozov A. Y., et al. The life cycle of energy. Energy management and the adoption of optimal solutions. Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V.; 2014. 190 p.

3. Petukhov G.B., Yakunin V.I. Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems. Moscow: AST; 2006. 504 p. (In Russ.).

4. Chekardovsky M. N., Zhilina T. S., Shalagin I. Yu., Mironov V. V. Comparative analysis of methods for calculating the efficiency of heat transfer in frame-panel housing construction. *International Journal of Civil Engineering*. 2018; 9(6): 40-47.

5. Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Chekardovskaya I. A. Development of a method for assessing the level of production efficiency. *Asia Life Sciences*. 2019; (1): 527-538.

6. Petrov A., Popov A., A Pushkarev., Chekardovsky M. Methodology for using the open source Protégé platform in development measuring and computing systems for diagnostics of thermal networks. In: *Materials of the CEUR seminar*. Moscow; 2021.

7. Akulov K., Golik V., Chekardovsky M., Serebrennikov A. Research of heat exchange pipes with spikes. In: *XV International Conference "Actual problems of architecture, civil engineering, energy efficiency and ecology – 2016"*. Les Ulis: EDP Sciences–France; 2016. 73: 01027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301027>.

8. Chekardovsky M., Chekardovsky S., Ilyukhin K., Gladenko A. Improved algorithm for calculating the turbo expander of gas distribution stations. In: *XV International Conference "Actual problems of architecture, civil engineering, energy efficiency and ecology – 2016"*. Les Ulis: EDP Sciences–France; 2016. 73: 01020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167301020>.

9. Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Chekardovskaya I. A., Mikhailenko A. I. Investigation of thermodynamic parameters of a microturbine for autonomous cogeneration. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Tyumen: Publishing House of the Physical Institute; 2016. P. 012005. DOI 10.1088/1757-899X/154/1/012005.

10. Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Robbers A. A., Ponomareva T. G. Frequency model of oscillatory processes in gas turbine drives of compressor stations of main gas pipelines. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Tyumen: Publishing House of the Physical Institute; 2016. P. 012023. DOI 10.1088/1757-899X/154/1/012023.

11. Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Ilyukhin K. N. Methods for determining thermodynamic parameters of gas pumping units of gas pipelines. In: *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. Tyumen: Publishing House of the Physical Institute; 2016. P. 012027. DOI 10.1088/1757-899X/154/1/012027.

12. Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 56-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>

13. Burtsev A. P., Bulgakov A.V., Yakovleva V. N. Variant of air flow control according to the "smart house" scheme using a complex multilayer plate heat exchanger. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction machinery*. 2023; (7): 60-63. (In Russ.).

14. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.

15. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., et al. Experimental study of the main characteristics of a complex multilayer plate heat exchanger. In: *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. Tyumen; 2022. 1242(1): 012042. DOI 10.1088/1757-899x/1242/1/012042.

Информация об авторах / Information about the Authors

Чекардовский Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: chekardovskijsm@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9303-5648>, ScopusID: 57190858464

Sergey M. Chekardovsky, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Transportation of Hydrocarbon Resources Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation, e-mail: chekardovskijsm@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9303-5648>, ScopusID: 57190858464

Чекардовская Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: chekardovskajaia@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5460-6265>, ScopusID: 57192157889

Irina A. Chekardovskaya, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Transportation of Hydrocarbon Resources Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation, e-mail: chekardovskajaia@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5460-6265>, ScopusID: 57192157889

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Оригинальная статья / Original article

УДК 697.921.45

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-40-51>

Коаксиальное локальное вытяжное устройство

Ю. А. Сиваченко ¹, О. Н. Зайцев ², А. П. Бурцев ² ✉

¹ Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Институт «Академия строительства и архитектуры»
ул. Киевская, д. 181, Республика Крым, г. Симферополь 295017, Российская Федерация

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

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Получение в результате исследований геометрических параметров устройства, при которых достигается улучшение условий формирования всасывающего потока. Предложение некоторых конструктивных решений вытяжного устройства для систем локальной вентиляции для удаления вредных выбросов при плазменной обработке металлов, позволяющих улучшить условия труда, выполнить промышленные испытания образца устройства.

Методы. Для получения пространственного представления о линиях тока, полях скоростей проводилось численное моделирование. Для получения зависимостей, формулирующих методики расчета аэродинамических и эколого-энергетических параметров результирующего течения при взаимодействии потока, образующихся вредностей со всасывающим потоком и радиальной ограничивающей прямооточной струей использовались физические методы моделирования.

Результаты. Получено подтверждение теоретических исследований конструкции локального вытяжного устройства с диффузором ограничителем, предназначенным для формирования ограничивающей радиальной струи и экспериментальных исследований на испытаниях промышленного образца локального вытяжного устройства предложенной конструкции.

Заключение. Рекомендованное локальное коаксиальное вытяжное устройство предложенной конструкции может существенно улучшить параметры микроклимата на стационарных местах плазменной резки для широкой номенклатуры машин для автоматизированной обработки различных металлов при плазменной резке металлов. Полученные на основе экспериментальных и теоретических исследований коаксиального вытяжного устройства, в котором реализован принцип удаления вредностей из плоскости ниже обрабатываемой заготовки ограниченного радиально направленным распределяющим потоком, впервые получены значения осевых скоростей при различных расходах воздуха с оптимальным соотношением всасывающего и ограничивающего потоков β для запатентованной конструкции локального вытяжного устройства.

Ключевые слова: удаление; местный отсос; плазменная резка; всасывающий факел; удаление вредностей; локальное всасывание; плазменная резка.

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

Для цитирования: Сиваченко Ю.А., Зайцев О.Н., Бурцев А.П. Коаксиальное локальное вытяжное устройство // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 40-51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-40-51>.

Поступила в редакцию 27.12.2024

Подписана в печать 11.02.2025

Опубликована 14.04.2025

© Сиваченко Ю.А., Зайцев О.Н., Бурцев А.П., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(1): 40-51

Coaxial local exhaust device

Yuriy A. Sivachenko ¹, Oleg N. Zaitsev ², Alexey P. Burtsev ² ✉

¹ Vernadsky Crimean Federal University, Institute «Academy of Construction and Architecture»
181, Kievskaya str., Simferopol 295017, Russian Federation

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

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. For the geometric parameters of the device obtained as a result of studies, which improve the conditions for the formation of the suction flow. and the proposed design solutions of an exhaust device for local ventilation systems to remove harmful emissions during plasma metalworking, which make it possible to improve working conditions and perform industrial tests of the device sample.

Methods. Numerical modeling was performed to obtain a spatial representation of the current lines and velocity fields. Physical modeling methods were used to obtain dependencies that formulate methods for calculating the aerodynamic and ecological-energy parameters of the resulting flow during the interaction of the flow, the resulting hazards with the suction flow and the radial limiting ramjet.

Results. Confirmation of theoretical studies of the design of a local exhaust device with a limiter diffuser designed to form a limiting radial jet and experimental studies on tests of an industrial sample of a local exhaust device of the proposed design have been obtained.

Conclusion. The recommended local coaxial exhaust device of the proposed design can significantly improve the microclimate parameters at stationary plasma cutting sites for a wide range of machines for automated processing of various metals during plasma cutting of metals. Based on experimental and theoretical studies of a coaxial exhaust device, which implements the principle of removing hazards from the plane below the workpiece being processed, limited by a radially directed distributing flow, axial velocity values for various air flow rates with an optimal ratio of suction and limiting flows β for the patented design of a local exhaust device were obtained for the first time.

Keywords: removal; local suction; plasma cutting; suction torch; removal of harmful substances; local suction; plasma cutting.

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

For citation: Sivachenko Y. A., Zaitsev O. N., Burtsev A. P. Coaxial local exhaust device. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 40-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-40-51>.

Received 27.12.2024

Accepted 11.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

Применение для локализации и удаления вредных выбросов при плазменной резке металлов, из области под поверх-

ностью металла с помощью локального всасывания, активируемого радиальной струей воздуха имеет существенный потенциал, в том числе и для модернизации

ции средств местной вытяжной вентиляции, используемых при плазменной обработке металлов. Этот метод является перспективным решением в сравнении с традиционными современными способами борьбы и удаления вредных от порталных машин для плазменной резки металлов.

Одним из путей ограничения спектра всасывания и повышения потенциала всасывающих течений путем отсекания потока может служить раздача ограничивающего воздушного потока в плоскости перпендикулярной оси всасывающего потока

При раздаче воздушного потока подобным образом создается зона повышенного давления, формируемая потоком истекающего воздуха в плоскости, близкой перпендикулярно оси всасывания. При этом формируется подобие отсекающей плоскости. Применение такой схемы возможно при организации локальной вытяжной вентиляции при плазменной резке металлов, однако в литературных источниках описание подобных решений отсутствует.

Материалы и методы

В процессе резки под воздействием высокотемпературной струи происходит испарение металла из зоны реза, его окисление, в том числе и легирующих элементов, а конвективные потоки уносят пыль в зону дыхания. Существенной технологической особенностью плазменной резки металла, которая оказывает влияние на способ удаления вредных,

является последовательность разрезания заготовки. Процесс раскроя состоит из следующих технологических этапов: технологическое врезание – этап на котором происходит пробитие заготовки на всю ее толщину. Существует два способа выполнения пробития – механический для заготовок толщиной до 40 - 50 мм, при котором происходит высверливание. В дальнейшем с этого отверстия начинается проход плазмотрона при раскрое.

При втором способе происходит врезание при помощи плазменной дуги. Более предпочтительным является первый способ, при нем вредности локализуются максимально под плоскостью разрезаемого металла. Альтернативой может служить пробитие на отходе, начинаемое с края заготовки. В таком случае наибольшее количество вредных образуются также снизу. Следующим этапом является непосредственно раскрой заготовки, при этом процессе происходит выдувание расплавленного металла из шва. За счет высокой температуры плазмы микрочастицы металла конденсируются в воздухе и подвержены уносу в рабочую зону^{1,2}. Для исключения этого следует располагать вытяжное

¹ ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны" // Официальный сайт Роспотребнадзора РФ 2018. 170 с. URL: [https:// www.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/00b/gn-2.2.5.3532_18.pdf](https://www.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/00b/gn-2.2.5.3532_18.pdf).

² ГОСТ Р 56164-2014 Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета выбросов при сварочных работах на основе удельных показателей. М.: Стандартинформ, 2015. С. 35.

устройство как можно ближе к разгонному участку тепловой гетерогенной струи с потоком газа, образующейся в месте резки. На третьем этапе происходит завершение раскроя, при этом этапе следует учитывать, что как правило площадь покрытия листа за счет вырезания деталей уменьшается, что также может способствовать уносу вредностей. Существующие нормативные документы и литературные источники [1] рекомендуют учитывать эти факторы и располагать вытяжное устройство снизу или сбоку заготовки в зависимости от применяемого оборудования для плазменной резки, при этом скорость движения воздуха в плоскости реза должна быть не менее 1,5 м/с (при открытой поверхности стола) и не менее 2,5 м/с в рабочем сечении отсоса¹.

Таким образом, с учетом технологических факторов плазменной резки обоснована целесообразность позиционирования вытяжного устройства в нижней плоскости обрабатываемых заготовок, под плоскостью обрабатываемого изделия, а в результате проведенных численных и экспериментальных исследований, и учитывая технологические сведения о плазменной резке, изложенные в [2-4], была разработана модель локального вытяжного устройства, активированного ограничивающей радиальной струей (рис. 1-3).

¹ СП 4053-85. Санитарные правила на устройство и эксплуатацию оборудования для плазменной обработки материалов. М.: Издательство стандартов, 1985. С.5,6.

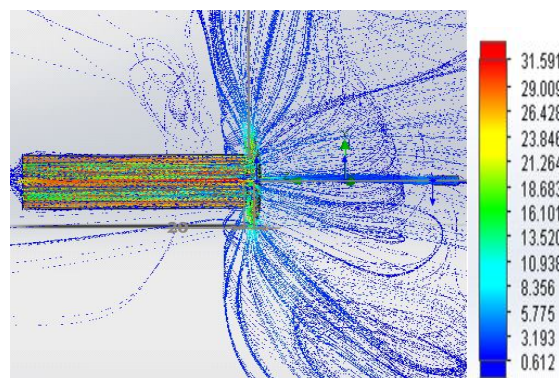


Рис. 1. Визуализация траектории потоков при $Q_{\text{вы}} = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\beta = 1$

Fig. 1. Visualization of the flow trajectory $Q_{\text{ed}} = 600 \text{ м}^3/\text{h}$, $\beta = 1$

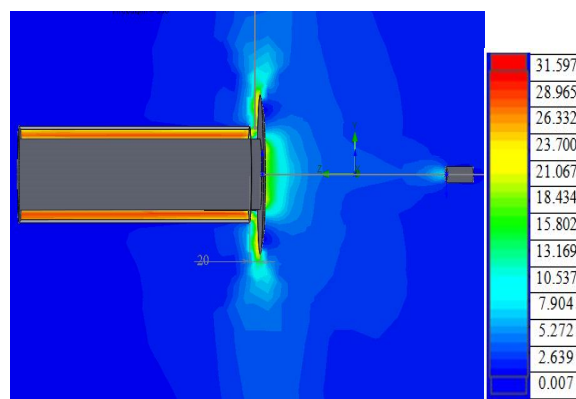


Рис. 2. Визуализация поля скоростей в сечении при $Q_{\text{вы}} = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\beta = 1$

Fig. 2. Visualization of the velocity field in the cross section $Q_{\text{ed}} = 600 \text{ м}^3/\text{h}$, $\beta = 1$

Опираясь на рекомендации, изложенные в [5-7], сведения в литературных источниках [8-11] и сведения, полученные в результате математического моделирования в программном комплексе Flowsimulation была разработана установка для удаления вредностей от раскройных столов, которая позволяет реализовать принцип локализации и удаление вредных выбросов при плазменной резке металлов из области под поверхностью раскройного металла с помощью локального всасывания, активируемого радиальной струей воздуха, модель которой представлена на рис. 4.

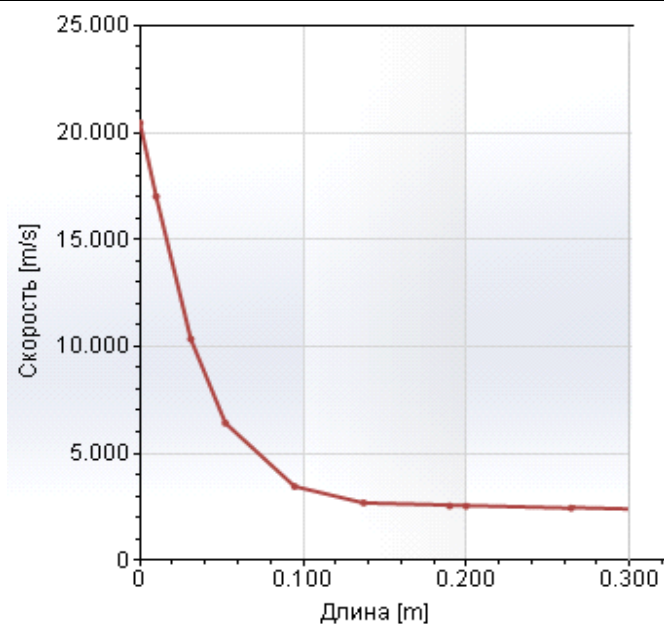


Рис. 3. График зависимости осевых скоростей от удаленности от оси всасывающего отверстия при $Q_{\text{вс}} = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$

Fig. 3. Graph of the dependence of axial velocities on the distance from the axis of the suction port $Q_{\text{ed}} = 600 \text{ м}^3/\text{h}$

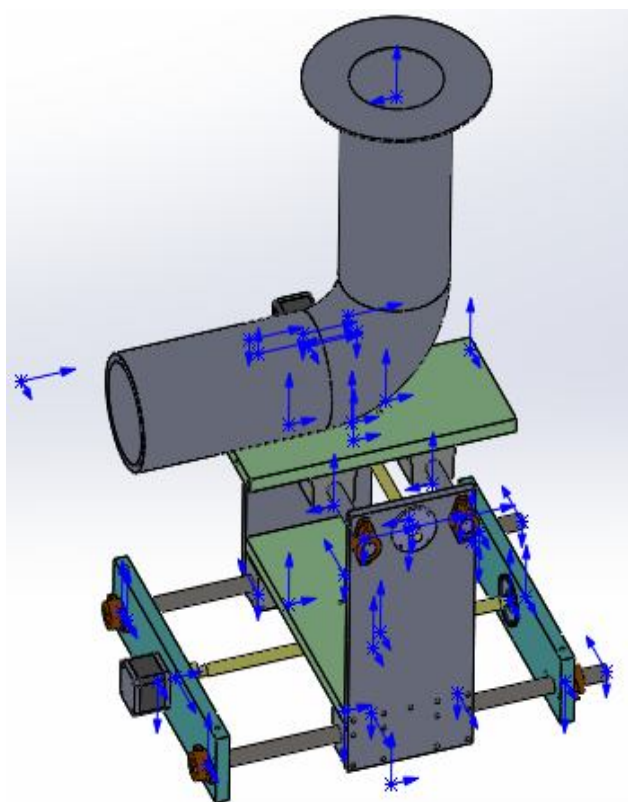


Рис. 4. Модель установки для удаления вредных веществ от раскроечных столов порталных машин плазменной резки

Fig. 4. Model of the installation for removing harmful substances from cutting tables of portal plasma cutting machines

Установка состоит из локального вытяжного устройства и приточно-вытяжной установки с фильтром, состоящей из двухканальных вентиляторов и фильтра.

Локальное вытяжное устройство активированное ограничивающей радиальной струей состояло из двух стальных трубопроводов длиной 300 мм, диаметры внутреннего D_v и наружного D_n трубопровода составили 100 мм и 115 мм соответственно установленных коаксиально, двух отводов диаметром 160 мм и 125 мм и системы воздухопроводов для подключения к вентиляторам и фильтру. Диффузор-ограничитель выполнялся из листов тонколистовой стали, соединенных вместе резьбовым способом. Диаметр диффузора – 200 мм. Диффузор устанавливался на расстоянии $l_1 = 20$ мм от наружной трубы. Угол установки диффузора-ограничителя относительно оси трубопроводов – 90° .

Раскраиваемая заготовка представляет собой стальной диск толщиной 10 мм и диаметром 150 мм. Раскрой заготовки вви-

ду ее малой толщины осуществлялся с про-битием плазменной дугой при установленном значении тока $I = 25$ А. Раскроечный стол имел габариты 1500×1500 мм с приваренными по периметру пластинами шириной – 120 мм и ламелями, выполненными из стального уголка 40×40 . Вытяжное устройство размещалось на 50 – 80 см ниже уровня бортов и на 30 – 40 см от края стола с некоторым смещением по оси от разрезаемой заготовки.

Таким образом, расстояние от вытяжного устройства до заготовки по вертикальной оси составляло 20 см. Вентиляторы устанавливались на единый режим работы, соответствующий расходу $550 - 600 \text{ м}^3/\text{ч}$ удаляемого воздуха.

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 – 7 показаны 3 этапа разрезания заготовки: 1 – пробитие (рис. 5), 2 – выполнение реза (рис. 6), 3 – завершение реза (рис. 7).



Рис. 5. Фото удаления вредных веществ при первом технологическом этапе раскроя заготовки

Fig. 5. Photos of the removal of harmful substances during the first technological stage of cutting the workpiece



Рис. 6. Фото удаления вредных веществ при втором технологическом этапе раскроя заготовки

Fig. 6. Photos of the removal of harmful substances during the second technological stage of cutting the workpiece



Рис. 7. Фото завершающего технологического этапа раскроя заготовки

Fig. 7. Photo of the final technological stage of cutting the workpiece

Сравнивая этапы выполнения раскроя заготовки (см. рис. 5-7), можно утверждать, что наибольшим количеством выделяемых вредных веществ характеризуется этап 2, чуть меньшим количеством выделяемых вредных веществ характеризуется этап 1.

На рис. 8, 9 представлен вид сверху на разрезаемую деталь на втором этапе технологического процесса.

Как видно из приведенных фотографий, вытяжным устройством предложенной конструкции¹ осуществлялась достаточно эффективная локализация вредных веществ на всех этапах раскроя заготовки.

¹ Пат. № 207611 РФ.F24F 7/08 (2021.05) Коаксиальное локальное вытяжное устройство / Зайцев О.Н.; Сиваченко Ю.А. №2021105119; заявл. 25.02.2021 опублик. 03.11.2021 Бюл. № 31. 2 с.



Рис. 8. Фото удаления вредных веществ при втором технологическом этапе раскроя заготовки (вид сверху)

Fig. 8. Photo of the removal of harmful substances during the second technological stage of cutting the workpiece (top view)



Рис. 9. Фото удаления вредных веществ при втором технологическом этапе раскроя заготовки (вид сверху и сбоку)

Fig. 9. Photos of the removal of harmful substances during the second technological stage of cutting the workpiece (top and side view)

Уноса вредностей ограничивающим потоком не происходит, что соответствует визуализациям, полученным по результатам численного моделирования в программном комплексе Solidworks Flow-simulation¹ [12-15].

Для вышеуказанных параметров работы воздухораздающего устройства реализующего принцип локального всасывания, активируемого радиальной струей воздуха для местной вытяжной вентиляции, используемых при плазменной обработке металлов, которые использовались для создания экспериментального стенда с целью подтверждения теоретических выводов показало соответствие заявленным характеристикам.

Выводы

В результате проведенного исследования всасывающих факелов коаксиального вытяжного устройства, ограничен-

ного раздающим радиально направленным потоком получено экспериментальное подтверждение данных, полученных при моделировании воздействия всасывающего и радиально направленного ограничивающего потока. Получены геометрические параметры устройства, при которых достигается увеличение спектра всасывания локального вытяжного устройства предложенной конструкции, за счет определения схем, в которых достигается ограничение подтекания воздуха из задней полусферы точечного стока. Максимальная работоспособность предложенного устройства была достигнута при значении коэффициентов расхода $\beta = 1$, т.е. при равном соотношении расходов, при котором наблюдается достаточная стабилизация потока, а угол раскрытия ограничивающего радиального потока приближается к 90°.

Список литературы

1. Писаренко В.Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение, 1981. С. 92, 95-97.
2. Кортес А.Р. Сварка, резка, пайка металлов. М.: ООО «Арфа СВ», 1999. С. 138-141.
3. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка. М.: Машиностроение, 1974. С.72-74.
4. Ширшов И.Г., Котикова В.Н. Плазменная резка. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ие, 1987. С.131-133.
5. Алямовский А.А. SolidWorksSimulation: Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.

¹ Пат. РФ. № 2046258F24F 7/06 Способ локальной вытяжной вентиляции и устройство для его осуществления /Спотарь С.Ю., Чохар И.А, Лукашов В.В, Прозоров Д.С. // 5050257/29; заявл. 30.06.1992; опубл. 20.10.1995. 8 с.

6. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб., 2005. С.170-191.
7. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. М.: Бином, 2004. 448 с.
8. Michael R. FLYNN, PAM SUSI Local Exhaust Ventilation for the Control of Welding Fumes in the Construction Industry A Literature Review // Oxford University Press Ann. Occup. Hyg., 2012. 56(7): 764–776.
9. Seok-Hwan Jeong, Hyuk-Min Kwon, Se-Jin Ahn & Jeong-Hoon Yang. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2016. 15:1. P. 119-126.
10. Marin Gostimirović, Dragan Rodić, Milenko Sekulić, Andjelko Aleksić An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining // ADVANCED TECHNOLOGIES AND MATERIALS. 2020. Vol. 45, no. 1. P. 1-8.
11. Shakeel ZAIDI, Natvarbhai SATHAWARA, Sunil KUMAR, Sumitra GANDHI, Chimanlal PARMAR and Habibullah SAIYED Development of Indigenous Local Exhaust Ventilation System: Reduction of Welders Exposure to Welding Fumes // Journal of Occupational Health. 2004. Vol. 46. P. 323–328.
12. Способ удаления вредных веществ от мест плазменной резки / В. Гуцу, С.А. Егоров, Т.Д. Целый, О.Н. Зайцев, Ю.А. Сиваченко // Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды. XII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: статьи и тезисы. Уфа: Изд-во ЦИТО+, 2023. С. 133-136.
13. Исследование эффективности работы вентсистем / С.Н. Шатило [и др]. Гомель: БелГУТ, 2015. 46 с.
14. Сборник материалов Международной конференции студентов аспирантов и молодых учёных «Перспектива Свободный-2016», посвящённой Году образования в Содружестве Независимых Государств. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. С. 4-7.
15. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб.: Химиздат, 2005. 659 с.

References

1. Pisarenko V.L. Ventilation of workplaces in welding production. Moscow: Mashinostroenie; 1981. P. 92, 95-97 (In Russ.).
2. Cortes A.R. Welding, cutting, soldering of metals. Moscow: Arfa SV; 1999. P. 138-141 (In Russ.).
3. Vasiliev K.V. Plasma arc cutting. Moscow: Mashinostroenie; 1974. P.72-74 (In Russ.).

4. Shirshov I.G., Kotikova V.N. Plasma cutting. Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-ie; 1987. P.131-133 (In Russ.).
5. Alyamovsky A.A. SolidWorksSimulation: Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations. Moscow: DMK Press; 2015. 562 p. (In Russ.).
6. Alyamovsky A.A. SolidWorks. Computer modeling in engineering practice. St. Petersburg; 2005. P.170-191 (In Russ.).
7. Prokhorenko V.P. SolidWorks Practical Guide. Moscow: Binom; 2004. 448 p. (In Russ.).
8. Michael R. Flynn, Pam Susi Local Exhaust Ventilation for the Control of Welding Fumes in the Construction Industry—A Literature Review. Oxford University Press Ann. Occup. Hyg.; 2012. 56(7): 764–776.
9. Seok-Hwan Jeong, Hyuk-Min Kwon, Se-JinAhn&Jeong-Hoon Yang. A Study on the Improvement of Ventilation Rate Using Air-flow Inducing Local Exhaust Ventilation System. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2016; 15:1: 119-126.
10. Marin Gostimirović*, Dragan Rodić, Milenko Sekulić, AndjelkoAleksićAn Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining. *Advanced technologies and materials*. 2020; 45(1): 1-8.
11. Shakeel Zaidi, Natvarbhai Sathawara, Sunil Kumar, Sumitra Gandhi, Chimanlal Parmar and Habibullah Saiyed. Development of Indigenous Local Exhaust Ventilation System: Reduction of Welders Exposure to Welding Fumes. *Journal of Occupational Health*. 2004; 46: 323–328.
12. Gutsu V., Egorov S.A., Whole T.D., Zaitsev O.N., Sivachenko Yu.A. Method for removing harmful substances from plasma cutting sites. In: *Vodosnabzhenie, vodootvedenie i sistemy zashchity okruzhayushchei sredy. XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Stat'i i tezisy = Water supply, water disposal and environmental protection systems. XII International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. Articles and theses*. Ufa: CITO+; 2023. P. 133-136 (In Russ.).
13. Shatilo S.N., et al. Study of the efficiency of ventilation systems. Gomel: BelGUT; 2015. 46 p. (In Russ.).
14. Collection of materials of the International Conference of Postgraduate Students and Young Scientists «Svobodny Avenue-2016», dedicated to the Year of Education in the Commonwealth of Independent States. Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet; 2016. P. 4-7 (In Russ.).
15. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamic principles of aspiration. St. Petersburg: Khimizdat; 2005. 659 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Сиваченко Юрий Анатольевич, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Институт «Академия строительства и архитектуры», г. Симферополь, Российская Федерация, e-mail: strikermk12@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-982x>

Yuri A. Sivachenko, Post-Graduate Student of Heat, Gas Supply and Ventilation Department, Vernadsky Crimean Federal University, Institute «Academy of Construction and Architecture», Simferopol, Russian Federation, e-mail: strikermk12@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-982x>

Зайцев Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zon071941@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-9355>, ScopusID: 57198778856

Oleg N. Zaitsev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: zon071941@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-9355>, ScopusID: 57198778856

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

УДК 004.912 + 004.89

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-52-78>

Взаимодействие когнитивных и реактивных агентов в интеллектуальной вычислительной системе: принципы организации

Н.С. Карамышева¹, С.А. Зинкин¹

¹ Пензенский государственный университет
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

e-mail: zsa49@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Постановка проблемы обусловлена перспективой эволюционирования существующей Всемирной паутины (World Wide Web) в Семантическую паутину (Semantic Web). Целью настоящей работы является разработка интеллектуальной мультиагентной среды с агентами различных типов: когнитивными и дедуктивными реактивными. Показано, что хранилище знаний (knowledge) и убеждений (beliefs) когнитивных BDI-агентов (BDI – аббревиатура от Belief–Desire–Intention) в виде фактов экстенциональной базы данных может быть использовано для получения новых знаний и убеждений путем дедуктивного вывода в среде интенциональной базы данных агентов, обладающих дедуктивными презумпциями.

Методы. Работа интеллектуальной системы описана не полностью определенным концептуальным графом и системой продукционных правил, пригодных для представления дедуктивных презумпций агентов в декларативно-императивном языке программирования высокого уровня. Реактивные агенты реализуют свои рациональные поведения на основе дедуктивных способностей, под которыми подразумевается умение строить корректные выводы.

Результаты. Предложена реализация интеллектуальной агентно-базированной системы. На концептуальном уровне архитектуру интеллектуальной агентно-базированной системы предлагается представить тремя подуровнями. Когнитивность агентов, работающих на первом и втором подуровнях, связана с модальностями. На основе сформулированных трактовок на третьем подуровне реактивные агенты реализуют свои рациональные поведения на основе дедуктивных способностей, под которыми подразумевается умение строить корректные выводы.

Заключение. Показано, что программная реализация когнитивных презумпций может выполняться с применением обычных императивных языков программирования и, возможно, языков манипулирования данными. На примере восполнения недостающих отношений в конкретной предметной области продемонстрирована реализация функций дедуктивных реактивных агентов при выполнении операций с концептуальными графами.

Ключевые слова: интеллектуальная система; концептуальные графы; дедуктивные агенты; интенционал; экстенционал; дедуктивный вывод; программная реализация.

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

Для цитирования: Карамышева Н.С., Зинкин С.А. Взаимодействие когнитивных и реактивных агентов в интеллектуальной вычислительной системе: принципы организации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025. Т. 29, №1. С. 52-78. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-52-78>.

Поступила в редакцию 30.11.2024

Подписана в печать 12.01.2025

Опубликована 14.04.2025

Interaction of cognitive and reactive agents in an intelligent computing system: principles of organization

Nadezhda S. Karamysheva ¹, Sergey A. Zinkin ¹ ✉

¹ Penza State University

40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: zsa49@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The problem statement is inspired, among other things, by the fact of the evolution the existing World Wide Web into the Semantic Web. The aim of this work is to develop a multi-agent environment with agents of different types: cognitive and deductive reactive. It is shown that the knowledge and beliefs storage of cognitive BDI agents (BDI is an abbreviation for Belief–Desire–Intention) in the form of facts of an extensional database can be used to obtain new knowledge and beliefs by deductive inference in the environment of an intensional database of agents possessing deductive presumptions.

Methods. The operation of an intelligent system is described by an incompletely defined conceptual graph and a system of production rules suitable for representing deductive presumptions of agents in a high-level declarative-imperative programming language. Reactive agents implement their rational behaviors based on deductive abilities, which are understood as the ability to build correct conclusions.

Results. The implementation of an intelligent agent-based system is proposed. At the conceptual level, the architecture of the intelligent agent-based system is proposed to be represented by three sublevels. The cognition of agents working at the first and second sublevels is associated with modalities. Based on the formulated interpretations at the third sublevel, reactive agents implement their rational behavior based on deductive abilities, which imply the ability to build correct conclusions.

Conclusion. It is shown that the software implementation of cognitive presumptions can be performed using conventional imperative programming languages and, possibly, data manipulation languages. The implementation of the functions of deductive reactive agents when performing operations with conceptual graphs is demonstrated using the example of filling in missing relations in a specific subject area.

Keywords: intelligent system; conceptual graphs; cognitive agents; reactive agents; presumptions; epistemic parameters; deductive inference; beliefs; true- beliefs.

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

For citation: Karamysheva N. S., Zinkin S. A. Interaction of cognitive and reactive agents in an intelligent computing system: principles of organization. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 52-78 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-52-78>.

Received 30.11.2024

Accepted 12.01.2025

Published 14.04.2025

Введение

Когнитивные и реактивные агенты. Когнитивная функциональная архитектура интеллектуальной системы может быть определена как структура, обеспечивающая реализацию антропоморфных и нейроморфных функций в естественных или искусственных системах. Однако на современном этапе создания когнитивных структур, берущих свое начало от характеристик психических процессов личности, данные характеристики зачастую могут рассматриваться лишь как красивые метафоры, имеющие опосредованное отношение к личности и используемые для усиления смыслового содержания и вызова эмоциональной реакции пользователя [1]. При этом отдельные высокоуровневые функции мозга могут рассматриваться как мнемонические указания на то, как трактуются логические (не модальные) модели процессов познавательного поведения человека и его «аватара», воплощенного в виде программы для компьютера или киберфизической системы [2].

В настоящей работе предлагается учитывать познавательную сферу в структуре психических процессов когнитивного, то есть способного к познавательной деятельности агента-человека. Как известно [3, 4, 5], познавательные процессы личности включают ощущение, внимание, восприятие, представление, память, воображение, мышление и речь. Мотивационные элементы структуры психи-

ки личности, такие как установки, интересы, желания, впечатления приводят к появлению или усилению новообразований – знаний, умений, навыков и привычек.

Используемые в настоящей работе когнитивные и реактивные интеллектуальные агенты различаются по составу и количеству реализуемых когнитивных и дедуктивных презумпций [6, 7]. Когнитивный агент – это агент, способный воспринимать информацию и интерпретировать ее в соответствии со своей моделью знаний. Реактивный агент, в отличие от когнитивного агента, обладает ограниченными когнитивными свойствами или не обладает ими вовсе. Однако реактивный агент может принимать поручения от когнитивных агентов, например, на реализацию дедуктивного вывода [8, 9].

Логика и технология BDI-агентов. В предыдущей работе авторов [10] при решении задачи о восполнении отношений в концептуальном графе на начальном этапе предложено воспроизводить рассуждения на основе когнитивных эпистемических презумпций, которыми считаются презумпции, представляющие *знания* (англ. *knowledges*) агентов о положении дел и о других агентах и их когнитивных презумпциях, а также *убеждения* (англ. *beliefs*) агентов и способности агентов, влияющие на способности получения, хранения и изменения информации, в частности *знаний и убеждений* [11, 12, 13]. *Цель* (англ. *goal*,

objective) – это *желание* (англ. *desire*), выбранное агентом к исполнению. *Намерения* (англ. *intentions*) отражают осознанный выбор агента, то есть тот план (англ. *plan*), который BDI-агент (аббревиатура от *Belief–Desire–Intention*) предпочел выполнять. Существуют и другие эпистемические презумпции когнитивных агентов, например, *обязательства* (англ. *obligations*), *способность* (англ. *capability*), *решение* (англ. *decision*), *выбор* (англ. *choice*), *заключение* (англ. *commitment*), *согласование* (англ. *coordination*)¹ [13, 14]. При программной агентно-ориентированной интерпретации данных презумпций их имена возможно использовать в качестве имен методов-процедур для агентов-объектов.

Известны работы, положившие развитие когнитивной логики BDI-агентов. В классической работе [15] предложена модель рассуждения агента, в которой использованы механизмы вывода на основе ментальных понятий; в результате на основе модальной логики предложено, как можно категоризовать различные комбинации взаимодействий между *убеждениями, желаниями и намерениями*.

Авторы работы [16], вводя первичные и вторичные эмоции в архитектуру BDI, представляют общую архитектуру для эмоционального агента, EBDI (*Emotion, Belief, Desire and Intention*), которая может объединять различные теории

эмоций с процессом рассуждения и обучения агента.

В работе [17] предложена интеллектуальная среда для разработки гибридных когнитивных агентов, обладающих причинно обусловленной реактивностью, эмоциональной ментальностью и способностью к обучению.

В нашей предыдущей работе [10] показано, что хранилище *знаний* (*knowledge*) и *убеждений* (*beliefs*) когнитивных BDI-агентов в виде фактов экстенсionalной базы данных (ЭБД – база данных, содержащая только факты и не содержащая правил) может быть использовано для получения новых *знаний* и *убеждений* путем дедуктивного вывода в среде интенсionalной базы данных (ИБД – база данных, содержащая правила) агентов, обладающих дедуктивными презумпциями. При этом логика и технология BDI-агентов используется фактически на концептуальном уровне в виде полезных метафор и реализуется на уровне языка хранения и манипулирования данными и знаниями.

В настоящей работе делается попытка воспроизведения модели практических рассуждений человека в ситуациях, когда приходится принимать решения когнитивному агенту, обладающему более развитым интеллектом по сравнению с реактивным агентом. Этим рассуждениям приблизительно соответствуют такие элементы структуры психики когнитивного агента-человека, как представление, память, воображение, мышление, принятие решений.

¹ Модель убеждений, желаний и намерений.
URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Модель_убеждений,_желаний_и_намерений.

Для справки [18]: «Формальные модели интеллектуальных агентов часто строятся с использованием различных модальных логик. Модальная логика – логика, содержащая, помимо стандартных логических связей, переменных и/или предикатов, модальные операторы (модальности). В соответствии с типами используемых модальностей, существует множество модальных логик: алетические (*необходимо, возможно*); временные (*когда-то, в будущем, всегда в прошлом, всегда* и др.); пространственные (*здесь, где-то, близко* и др.); эпистемические, использующие высказывания, содержащие познавательные понятия (*полагает, сомневается, проверяемо, верифицируемо, не проверяемо* и др.); логики знания (*известно, что*); доказуемости (*можно доказать, что*); деонтические (изучают логические связи нормативных высказываний) и другие модальности».

Возможны различные аспекты поведения низкоуровневых компонент реактивного агента в зависимости от среды, в которую он помещен, а также различные представления об его интеллектуальности. В настоящем исследовании работа низкоуровневого агента формализуется на основе логики предикатов первого порядка и правила дедуктивного вывода.

Целью настоящей работы является разработка подхода к построению интеллектуальных систем на основе выполняемой семантической сети и мультиагентной среды с агентами различных

типов: когнитивными и дедуктивными реактивными.

В качестве примера для демонстрации предлагаемой методологии используется известная модель родственных и свойственных семейных отношений, концептуальный граф для которой приведен, например, в работах [19, 20]. При исследовании модели было решено ограничиться учетом кровного родства в одном поколении, в соседних поколениях и через поколение¹. Для простоты не приняты во внимание отношения «кузен-кузина». Отношения «муж» и «жена» условно считаются кровными родственными. Из рассмотрения исключены отношения-свойства (не кровные родственные).

Анализ данной модели основан на использовании эпистемических презумпций когнитивного антропоморфного агента или агента-человека, согласующего свою работу с реактивными агентами. Рассматривается тип реактивных агентов, обладающих дедуктивными презумпциями.

Материалы и методы

Обоснование трехуровневой функциональной архитектуры мультиагентной интеллектуальной системы. В настоящее время известны следующие платформы для разработки BDI-агентов: PRS, dMARS, AgentSpeak, Jason, JADEX,

¹ Кровное родство по прямой линии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Родство#Кровное_родство_по_прямой_линии.

2APL, 3APL, GOAL, Jack, SPARK и JAM [21]. Из указанных платформ активно развиваются dMARS [22], Jadex [23], Jason [24] и Jack [25], основанные на использовании знаний и убеждений (*knowledge, beliefs*), а также механизмов выбора намерений (*desires, goals, intentions*).

Разработка BDI-агентов должна поддерживаться платформами разработки агентов. Например, в системе PRS (система процедурного обоснования) структура данных архитектуры BDI состоит из убеждений, желаний, намерений и планов. Они должны быть объединены с использованием интерпретатора BDI, который выбирает соответствующие желания в качестве намерений на основе текущих убеждений. Наконец, интерпретатор отвечает за выбор и выполнение плана своих намерений [15, 26].

Однако, как показывает анализ работ [21-26], возможности полных высказываний модальной логики, к которой относится и BDI-логика, редко используются в разработке агентов, а также трудно (однако необходимо) найти реальное применение модальной логики, кроме как в концептуальной разработке систем.

Классификация типов когнитивных агентов включает три общих класса логических параметров, то есть компетенций, по которым агенты могут различаться: эпистемические, целевые, или акционально-деятельностные, и дедуктивные [27, 28]. В настоящей работе также считается справедливым положение, вытекающее из работ [27, 28], о

том, что эпистемические и целевые параметры выделения разных презумпций двух первых классов агентов выступают определенного рода надстройками (в том числе и модальными) над тем, каким образом трактуются дедуктивные параметры презумпций третьего класса, реализуемых в процессе кооперативного поведения когнитивных, рациональных и реактивных агентов.

Под данным видом презумпций третьего класса в настоящей работе понимаются различные немодальные логические системы, которые лежат в основании рассуждений реактивных дедуктивных агентов; при этом дедуктивные презумпции агентов характеризуют немодальную логику, используемую в качестве базовой, а именно, логику предикатов первого порядка. При необходимости к этой логике может быть затем добавлена модальная часть – эпистемическая или акционально-деятельностная.

Элементы методологии BDI-PRS построения функциональной архитектуры агентно-базированной системы. В искусственном интеллекте известна методология PRS¹ (англ. *Procedural Reasoning System*) процедурных рассуждений, которая представляет собой некоторую структуру (*framework*) для построения интеллектуальных систем, работающих в реальном времени и выполняющих сложные задачи в динамических средах. Фреймворк PRS был со-

¹ Procedural_reasoning_system. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural_reasoning_system.

здан на основе модели BDI и использовался в программном обеспечении для управления интеллектуальным агентом, предназначенным для обнаружения неисправностей в системе управления космическим челноком NASA Space Shuttle Discovery¹ [22, 26]. Разработка PRS продолжалась в Австралийском институте искусственного интеллекта, что привело к созданию новой реализации на языке C++ под названием dMARS – агентно-ориентированная среда для разработки и внедрения сложных, распределенных, критичных по времени систем. Разработанная для быстрой настройки и простоты интеграции, она облегчает проектирование, обслуживание и реинжиниринг систем.

Система PRS основана на понятии рационального агента или интеллектуального (когнитивного) агента, использующего программную модель BDI. Подобно модели, система PRS объясняет и интерпретирует функции реактивного агента, реализующего намерения и планы вышестоящего когнитивного агента. Однако, в отличие от системы планирования BDI, генерирующей полный план (при непредвиденных ситуациях возможно перепланирование), система PRS чередует планирование и выполнение действий².

Функциональная архитектура интеллектуальной системы, названная ар-

хитектурой BDI-PRS, включает следующие компоненты³:

- убеждения (*beliefs*), представленные в виде базы данных (фактов) о предметной области;
- желания (*desires*) и цели (*goals*), представленные в виде условий, которые должна реализовать система по описаниям внутреннего и внешнего состояния агента и предметной области;
- области знаний (*knowledge areas*) о планах (*plans*), которые определяют последовательности низкоуровневых действий для достижения цели в конкретных ситуациях;
- намерения (*intentions*), которые включают те знания, которые были выбраны для текущего и конечного выполнения;
- интерпретатор (*interpreter*), или механизм логического вывода (*inference engine*), который управляет системой.

Методология построения функциональной архитектуры BDI-PRS агентно-базированной системы предназначена для когнитивного «агента-человека», то есть для инженера по знаниям или системного программиста, и отражает его основные действия.

Основные этапы методологии BDI-PRS:

- анализ предметной области и выработка убеждений (*beliefs*), переходя-

¹ Procedural_reasoning_system. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural_reasoning_system.

² Там же.

³ Procedural_reasoning_system. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural_reasoning_system.

щих в процессе проектирования в знания (*true-beliefs*), и их представление в виде базы знаний (фактов) о предметной области; на данном этапе возможно построение концептуальной модели интеллектуальной системы;

- формирование желаний (*desires*) и целей (*goals*), состоящих в создании спецификаций для распределенного приложения, представленных в виде условий, которые должна реализовать система по описаниям внутреннего и внешнего состояния предметной области;

- формирование области знаний (*knowledge areas*) о планах (*plans*), которые определяют последовательность этапов формализации спецификаций для последующей реализации компьютерных программ;

- формирование намерений (*intentions*), которые включают те знания, которые выбираются для текущего и конечного выполнения и должны быть использованы при составлении правил работы интерпретатора;

- создание интерпретатора (*interpreter*) правил логического вывода (*inference engine*), на основании которых осуществляется управление распределенной интеллектуальной системой.

Предлагаемая реализация интеллектуальной агентно-базированной системы. В нашей предыдущей работе [1] была представлена трехуровневая архитектура интеллектуальной агентно-бази-

рованной системы (рис. 1), где на первом подуровне с архитектурой BDI работает агент-человек *BDI_agent1*, обладающий базой общих знаний (*knowledges*), убеждений (*beliefs*) и желаний (*desires*), используемой для формирования общих намерений (*intentions*), исполнение которых приведет к решению задачи; действия агента *BDI_agent1* разворачиваются в пространстве EHS (англ. *External Human Space*); данный агент передает управление в форме своих знаний и убеждений на нижележащий уровень агенту *BDI_agent2*.

На следующем, втором подуровне, реализуемом также на основе архитектуры BDI в пространстве GAS (англ. *Global Agent Space*), подфункции агента *BDI_agent2* реализуются на двух подуровнях: подфункция *BDI_agent2(B)* отражает убеждения (*beliefs*) агента о возможности получения результата – полного или частичного; результат может быть трансформирован из убеждений в знания.

На последнем, третьем подуровне – реактивном и частично когнитивном, вторая подфункция агента *BDI_agent2(DI)* определяет желания (*desires*) и намерения (*intentions*) агента *BDI_agent2*. Реактивные агенты, выполняя поручения когнитивного агента, помогают ему получать новые знания на основе дедуктивного вывода.

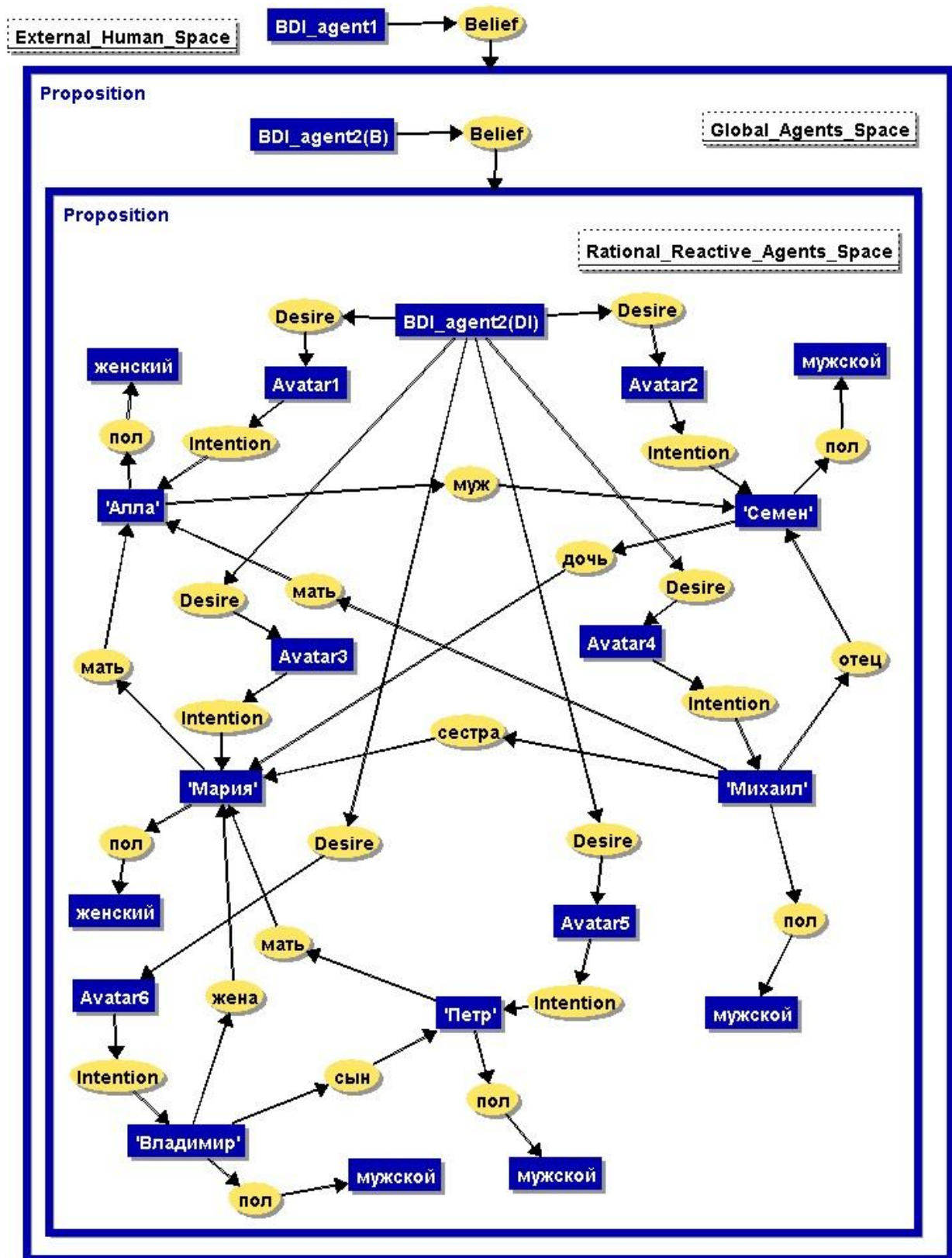


Рис. 1. Неполный концептуальный граф «Семейные отношения» и иерархия когнитивных и дедуктивных интеллектуальных агентов

Fig. 1. Incomplete conceptual graph "Family relations" and hierarchy of cognitive and deductive intelligent agents

В новой модели третий подуровень реализуется в пространстве RRAS (англ. *Rational Reactive Agent Space*) реактивных агентов.

На этом уровне происходит формирование намерений (*intentions*), которые включают те знания, которые выбираются для текущего и конечного выполнения и должны быть использованы при составлении правил работы интерпретатора (*interpreter*) правил логического вывода (*inference engine*), на основании которых осуществляется управление распределенной интеллектуальной системой.

На рис. 2 представлен неполный концептуальный граф «Родственные отношения» с частичным контекстным наполнением. Поставлена задача нахождения всех недостающих отношений в данном графе. При составлении правил логического вывода для реактивных агентов, работающих на нижнем уровне архитектуры BDI-PRS, предлагается использование языка Пролог.

Основы дедуктивного логического вывода в Пролог-программах хорошо известны и описаны, например, в работах [29, 30]. Как известно, «Пролог – это полный по Тьюрингу язык программирования общего назначения, который хорошо подходит для приложений интеллектуальной обработки знаний. Особый интерес представляет собой одно из направлений развития языка, реализующее концепцию интеллектуальных агентов. Программа на языке Пролог состоит из набора фактов, кото-

рые описывают отношения между объектами и правил, позволяющих находить новые отношения. Пролог использует метод дедуктивного вывода на основе принципа резолюции. Программа на Прологе способна находить ответы на вопросы, заданные в виде целей. Программа выполняет поиск в базе знаний, используя унификацию и логический вывод, чтобы найти все возможные решения для заданной цели»¹. При программировании на языке Пролог нередко приходится учитывать не только его декларативную, но и процедурную, или императивную, семантику. Последняя связана с определением порядка следования утверждений Пролога.

Результаты и их обсуждение

Интеллектуальная система для поиска отношений между объектами, использующая когнитивные (эпистемические) и дедуктивные (реактивные) агенты. Для продолжения решения задачи поиска недостающих предикатных имен предпринимаются действия, обусловленные новой иерархической структурой когнитивных и дедуктивных реактивных интеллектуальных агентов.

Этапы применения методологии BDI-PRS при реализации:

- интеллектуальной системы с когнитивными и реактивными;
- дедуктивными агентами.

¹ Пролог. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Prolog/>.

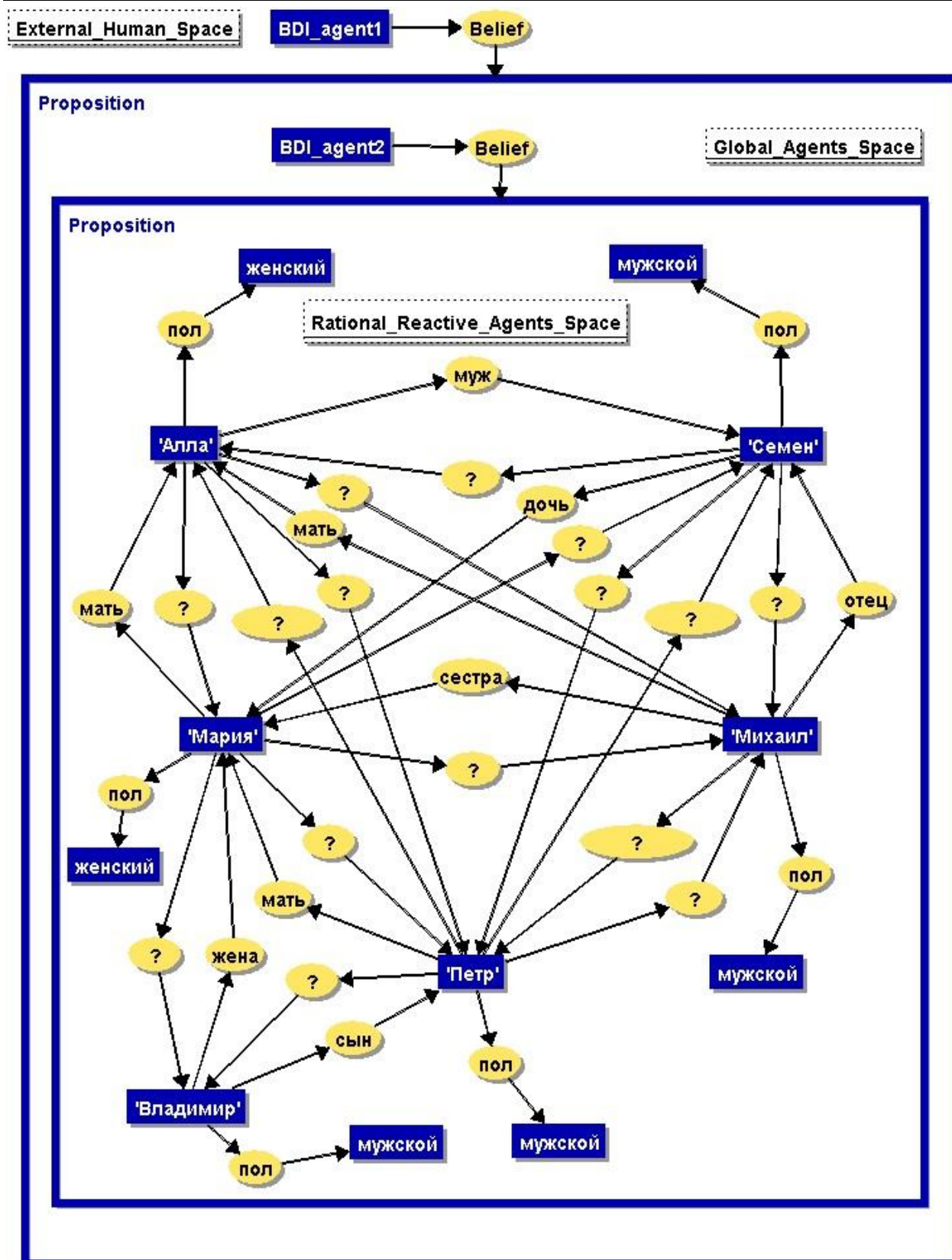


Рис. 2. Неполный концептуальный граф «Семейные отношения» с частичным контекстным наполнением

Fig. 2. Incomplete conceptual graph "Family Relationships" with partial contextual filling

Формирование базы знаний и убеждений когнитивного агента BDI-agent1.

TRUE-BELIEFS (определение области знаний). Анализ предметной области (рис. 2) показывает, что когнитивному агенту BDI-agent1 должно быть известно множество субъектов предметной области $H = \{\text{Алла, Семен, Мария, Михаил, Петр, Владимир}\}$ и множество отношений $R = \{\text{жена, мать, муж, отец, дочь, сын, сестра}\}$.

BELIEFS (определение убеждений). На основании неполного концептуального графа на рис. 2 когнитивный агент BDI-agent1 может быть убежден в том, что между субъектами предметной области могут быть установлены отношения $D = \{\text{жена, мать, муж, отец, дочь,}$

$\text{сын, сестра, брат, дядя, тетя, племянник, племянница, бабушка, дедушка, внук, внучка}\}$, часть из которых относится к знаниям (*true-beliefs*), $R \subset D$.

Передача элементов множества D когнитивному агенту BDI-agent2. На основе элементов множества D и базы фактов и правил, то есть базы знаний, интеллектуальной системы будет сформирована KNOWLEDGE AREA & PLAN – область знаний о планах действий когнитивного агента BDI-agent2 и подчиненного ему агента-слуги Avatar.

DESIRES & GOALS (формирование желаний и целей когнитивного агента BDI-agent2). Желания и цели непосредственно и автоматически определяются по концептуальному графу на рис. 2:

? of 'Мария' is 'Семен';	? of 'Семен' is 'Петр';
? of 'Алла' is 'Михаил';	? of 'Мария' is 'Владимир';
? of 'Семен' is 'Алла';	? of 'Алла' is 'Мария';
? of 'Петр' is 'Владимир';	? of 'Мария' is 'Петр';
? of 'Петр' is 'Михаил';	? of 'Петр' is 'Семен';
? of 'Михаил' is 'Петр';	? of 'Семен' is 'Михаил';
? of 'Петр' is 'Алла';	? of 'Мария' is 'Михаил';
? of 'Алла' is 'Петр';	

где символ вопроса «?» обозначает, что необходимо определить соответствующее отношение. Например, запись «? of 'Алла' is 'Петр'» означает, что необходимо определить родственное отношение, связывающее Аллу и Петра.

Define KNOWLEDGE AREAS & PLANS (формирование области знаний о планах когнитивного агента BDI-agent2 и подчиненных ему реактивных

агентов-слуг Avatars). Обычный язык Пролог¹, в основу которого положена логика предикатов первого порядка FOL (англ. *First Order Logic*), не допускает использование переменных в каче-

¹ Пролог. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Prolog/>; SWI-Prolog. Robust, mature, free. Prolog for the real world. URL: <https://www.swi-prolog.org/>; Wilemaker J. SWI-Prolog Semantic Web Library 3.0. URL: [https://www.swi-prolog.org/pldoc/doc_for?object=section\(%27packages/semweb.html%27\)](https://www.swi-prolog.org/pldoc/doc_for?object=section(%27packages/semweb.html%27)).

стве предикатных символов, поэтому в настоящей работе эта проблема обходится за счет переинтерпретации логической модели запросов в п.2 на основе

использования тернарных (трехместных) предикатов для построения запросов к базе знаний:

?- d('Мария', X, 'Семен').	?- d('Семен', X, 'Петр').
?- d('Алла', X, 'Михаил').	?- d('Мария', X, 'Владимир').
?- d('Семен', X, 'Алла').	?- d('Алла', X, 'Мария').
?- d('Петр', X, 'Владимир').	?- d('Мария', X, 'Петр').
?- d('Петр', X, 'Михаил').	?- d('Петр', X, 'Семен').
?- d('Михаил', X, 'Петр').	?- d('Семен', X, 'Михаил').
?- d('Петр', X, 'Алла').	?- ('Мария', X, 'Михаил').
?- d('Алла', X, 'Петр').	

Здесь для каждого запроса при помощи реактивного агента-слуги Avatar переменная d пробегает по всем элементам множества D отношений, в существовании которых убежден когнитивный агент BDI-agent2. Например, при ответе «true» на запрос

«?- d('Мария', X, 'Семен')»

станет известен тот факт, что субъекты предметной области *Мария* и *Семен* связаны отношением, имя которого содержится в предметной переменной X , значение которой в данный момент равно значению переменной d . Таким образом постепенно будет сформирована область знаний KNOWLEDGE AREA на основании плана PLAN взаимодействий когнитивного агента BDI-agent2 с подчиненным ему реактивным агентом-слугой Avatar. Этот план может быть реализован только после того, как будет создана база знаний интеллектуальной системы, содержащая факты и правила вывода.

Define INTENTIONS – формирование намерений, которые включают те знания, которые выбираются для текущего и конечного выполнения и должны быть использованы при составлении правил работы интерпретатора машины вывода в логике предикатов первого порядка. В рамках этапа 4 осуществляется представление фактов и правил о предметной области в виде программы на языке SWI-Prolog. Для реализации самого нижнего уровня иерархии интеллектуальной системы использована программа на языке Пролог, построенная на основе логической модели рис. 1 и рис. 2 и дополнительных правил. Используемая версия SWI-Prolog – это свободно распространяемая реализация языка программирования Пролог¹. Более подробные сведения об интеграции

¹ SWI-Prolog. Robust, mature, free. Prolog for the real world. URL: <https://www.swi-prolog.org/>; Wielemaker J. SWI-Prolog Semantic Web Library 3.0. URL: [https://www.swi-prolog.org/pldoc/doc_for?object=section\(%27packages/semweb.html%27\)](https://www.swi-prolog.org/pldoc/doc_for?object=section(%27packages/semweb.html%27)).

языка SWI-Prolog с другими языками можно найти по ссылкам на сайте <https://www.swi-prolog.org>.

В силу сказанного в дальнейшем без ограничения общности будем считать программу на Прологе «агентом Prolog», непосредственно взаимодействующим с агентом-посредником, или агентом-службой, Avatar. Программа агента Prolog тиражируется, и каждая ее копия связывается с программой агента Avatar, что делает возможной параллельную работу с несколькими копиями базы знаний.

```
пол('Алла',женский).
пол('Владимир',мужской).
пол('Мария',женский).
пол('Михаил',мужской).
пол('Петр',мужской).
пол('Семен',мужской).
родство_дочь('Семен',дочь,'Мария').
родство_жена('Владимир',жена,'Мария').
родство_мать('Мария',мать,'Алла').
родство_мать('Михаил',мать,'Алла').
родство_мать('Петр',мать,'Мария').
родство_муж('Алла',муж,'Семен').
родство_сын('Владимир',сын,'Петр').
родство_отец('Михаил',отец,'Семен').
родство_сестра('Михаил',сестра,'Мария').
```

Beliefs: правила для интенциональной базы данных (ИБД), составленные на основе концептуального графа на рис. 2:

```
родство_сын1(Y, сын, X): –родство_мать(X, мать, Y),
пол(X, мужской),пол(Y, женский).
родство_сын1(Y, сын, X): –родство_отец(X, отец, Y),
пол(X, мужской), пол(Y, мужской).
родство_дочь1(Y, дочь, X): –родство_мать(X, мать, Y),
пол(X, женский), пол(Y, женский).
родство_дочь1(Y, дочь, X): –родство_отец(X, отец, Y),
пол(X, женский), пол(Y, мужской).
родство_жена1(Y, жена, X): –родство_муж(X, муж, Y),
```

Ниже представлена программа агента на языке Пролог, состоящая из двух частей – достоверно известных фактов типа *true-beliefs* для экстенциональной базы данных (ЭБД) и правил формирования отношений типа *beliefs* для интенциональной базы данных (ИБД); совместно ЭБД и ИБД образуют базу знаний ЭБД+ИБД.

True-beliefs: факты для экстенциональной базы данных (ЭБД), составленные на основе концептуального графа рис. 1:

пол(X, женский).

родство_муж1(X, муж, Y): – родство_жена(Y, жена, X), пол(Y, мужской), пол(X, женский).

родство_брат1(X, брат, Y): – родство_сестра(Y, сестра, X),

пол(Y, мужской), пол(X, женский).

родство_сестра1(X, сестра, Y): – родство_брат1(Y, брат, X),

пол(Y, женский), пол(X, мужской).

родство_отец1(X, отец, Y): – родство_сын(Y, сын, X),

пол(Y, мужской), пол(X, мужской).

родство_отец1(X, отец, Y): – родство_дочь(Y, дочь, X),

пол(Y, мужской), пол(X, женский).

родство_мать1(X, мать, Y): – родство_сын(Y, сын, X),

пол(Y, женский), пол(X, мужской).

родство_мать1(X, мать, Y): – родство_дочь(Y, дочь, X) ,

пол(Y, женский), пол(X, женский).

родство_бабушка(X, бабушка, Z): – (родство_отец(X, отец, Y);

родство_отец1(X, отец, Y)), (родство_мать(Y, мать, Z);

родство_мать1(Y, мать, Z)), пол(Y, мужской), пол(Z, женский).

родство_бабушка(X, бабушка, Z): – (родство_мать(X, мать, Y);

родство_мать1(X, мать, Y)), (родство_мать(Y, мать, Z);

родство_мать1(Y, мать, Z)), пол(Z, женский), пол(Y, женский).

родство_дедушка(X, дедушка, Z): – (родство_отец(X, отец, Y);

родство_отец1(X, отец, Y)), (родство_отец1(Y, отец, Z);

родство_отец(Y, отец, Z)), пол(Y, мужской), пол(Z, мужской).

родство_дедушка(X, дедушка, Z): – (родство_мать(X, мать, Y);

родство_мать1(X, мать, Y)) , (родство_отец(Y, отец, Z);

родство_отец1(Y, отец, Z)), пол(Y, женский), пол(Z, мужской).

родство_внук(X, внук, Y): – родство_дедушка(Y, дедушка, X),

пол(Y, мужской), пол(X, мужской).

родство_внук(X, внук, Y): – родство_бабушка(Y, бабушка, X),

пол(Y, мужской), пол(X, женский).

родство_внучка(X, внучка, Y): – родство_бабушка(Y, бабушка, X), пол(X, женский),

пол(Y, женский).

родство_внучка(X, внучка, Y): – родство_дедушка(Y, дедушка, X), пол(X, мужской),

пол(Y, женский).

родство_племянник(Z, племянник, X): – (родство_мать(X, мать, Y);

родство_мать1(X, мать, Y)), (родство_сестра(Y, сестра, Z);

родство_сестра1(Y, сестра, Z)), пол(Y, женский), пол(Z, женский), пол(X, мужской).

родство_племянник(Z, племянник, X): – (родство_отец(X, отец, Y);

родство_отец1(X, отец, Y)), родство_брат1(Y, брат, Z),

пол(Y, мужской), пол(Z, мужской), пол(X, мужской).

родство_племянник(Z , племянник, X): $\neg(\text{родство_мать}(X, \text{мать}, Y);$
 родство_мать1(X , мать, Y)), родство_брат1(Y , брат, Z),
 пол(Y , женский), пол(Z , мужской), пол(X , мужской).
 родство_племянник(Z , племянник, X): $\neg(\text{родство_отец}(X, \text{отец}, Y);$
 родство_отец1(X , отец, Y)), (родство_сестра(Y , сестра, Z);
 родство_сестра1(Y , сестра, Z)), пол(Y , мужской), пол(Z , женский), пол(X , мужской).
 родство_племянница(Z , племянница, X): $\neg(\text{родство_мать}(X, \text{мать}, Y); \text{род-}$
 ство_мать1(X , мать, Y)), (родство_сестра(Y , сестра, Z);
 родство_сестра1(Y , сестра, Z)), пол(Y , женский), пол(Z , женский), пол(X , женский).
 родство_племянница(Z , племянница, X): $\neg(\text{родство_отец}(X, \text{отец}, Y);$
 родство_отец1(X , отец, Y)), родство_брат1(Y , брат, Z),
 пол(Y , мужской), пол(Z , мужской), пол(X , женский).
 родство_племянница(Z , племянница, X): $\neg(\text{родство_мать}(X, \text{мать}, Y);$
 родство_мать1(X , мать, Y)), родство_брат1(Y , брат, Z),
 пол(Y , женский), пол(Z , мужской), пол(X , женский).
 родство_племянница(Z , племянница, X): $\neg(\text{родство_отец}(X, \text{отец}, Y);$
 родство_отец1(X , отец, Y)), (родство_сестра(Y , сестра, Z);
 родство_сестра1(Y , сестра, Z)), пол(Y , мужской), пол(Z , женский), пол(X , женский).
 родство_дядя(X , дядя, Z): $\neg(\text{родство_отец}(X, \text{отец}, Y);$
 родство_отец1(X , отец, Y)), родство_брат1(Y , брат, Z),
 пол(Y , мужской), пол(Z , мужской).
 родство_дядя(X , дядя, Z): $\neg(\text{родство_мать}(X, \text{мать}, Y);$
 родство_мать1(X , мать, Y)), родство_брат1(Y , брат, Z),
 пол(Y , женский), пол(Z , мужской).
 родство_тетя(X , тетя, Z): $\neg(\text{родство_отец}(X, \text{отец}, Y);$
 родство_отец1(X , отец, Y)), (родство_сестра(Y , сестра, Z);
 родство_сестра1(Y , сестра, Z)), пол(Y , мужской), пол(Z , женский).
 родство_тетя(X , тетя, Z): $\neg(\text{родство_мать}(X, \text{мать}, Y);$
 родство_мать1(X , мать, Y)), (родство_сестра(Y , сестра, Z);
 родство_сестра1(Y , сестра, Z)), пол(Y , женский), пол(Z , женский).

INTERPRETER & INFERENCE ENGINE – создание интерпретатора правил логического вывода, на основании которых осуществляется управление распределенной интеллектуальной системой. Факты ЭБД и правила ИБД составляют единую программу. Отметим, что в программе использованы тернарные предикаты, для которых определены в качестве вторых аргументов имена

определенных и искомых отношений. Возможны и другие варианты программы. Представленный вариант основан на стремлении избежать рекурсий при выполнении программы. По этой причине модифицированы имена отношений в множестве D , по которым пробегает предметная переменная d :

$$D' = \{\text{родство_мать}, \text{родство_мать1}, \text{родство_отец}, \text{родство_отец1},$$

родство_жена, родство_жена1,
 родство_муж, родство_муж1,
 родство_дочь, родство_дочь1,
 родство_сын, родство_сын1,
 родство_сестра, родство_сестра1,
 родство_брат1, родство_бабушка,
 родство_дедушка, родство_внук,
 родство_внучка, родство_дядя,
 родство_тетя, родство_племянник,
 родство_племянница}.

Модификации осуществлены путем добавления приставки «родство» ко всем предикатным именам в программе на языке SWI Prolog и должны использоваться при формировании запросов к базе знаний ЭБД+ИБД. Кроме того, в модифицированное множество D' добавлены имена отношений родство_дочь1, родство_жена1, родство_мать1, родство_муж1, родство_сын1, родство_отец, родство_сестра1, так как они используются в правилах Пролог-программы для различения точно (true-beliefs) имеющихся и возможно (beliefs) имеющихся отношений.

SAMPLES – образцы диалога агента Avatar и агента Prolog. Запросы агента Avatar должны адресоваться к ЭБД (к фактам) и к ИБД (к правилам для дедуктивного вывода ответа) и составлены по типу выражений для запросов к программам на языке Пролог:

а) запрос к ЭБД и ответ:

? – родство_сын(А,В,С),
 А = 'Владимир', В = сын, С = 'Петр';

б) запрос к ИБД и 3 ответа:

? – родство_сын1(А,В,С),
 А = 'Алла', В = сын, С = 'Михаил';

А = 'Мария', В = сын, С = 'Петр';
 А = 'Семен', В = сын, С = 'Михаил'.

Из ответов видно, что Петр является общим сыном Марии и Владимира, а Михаил – общим сыном Аллы и Семена.

В случаях, когда в запросы синтаксически составлены правильно, но указываются отношения, отсутствующие в ЭБД или ИБД, интерпретатор языка Пролог указывает на ошибочные ситуации, которые могут быть проанализированы и учтены реактивным агентом и когнитивным агентом BDI-agent2, реагирующим на сообщения соответствующего агента-аватара.

Реализация запросов агента Avatar к агенту Prolog. Одним из способов нахождения неизвестных отношений в концептуальном графе на рис. 1 является получение ответов на запросы в базе знаний ЭБД+ИБД для каждого персонажа из множества членов семейства *H*. Для нахождения семейных отношений, или связей, каждого персонажа с другими членами семейства, агенты-аватары, реализуя имеющиеся у них *намерения*, используют запросы следующего вида:

«? – имя_отношения(список_переменных или_констант)».

Например, задавая запросы от персонажа 'Семен' к персонажам из множества *H* и наоборот, от данных персонажей к персонажу 'Семен', получим имена отношений и персонажей, с которыми он имеет какие-либо родственные связи. Результирующий концептуальный граф для концепта 'Семен' приведен на рис. 3.

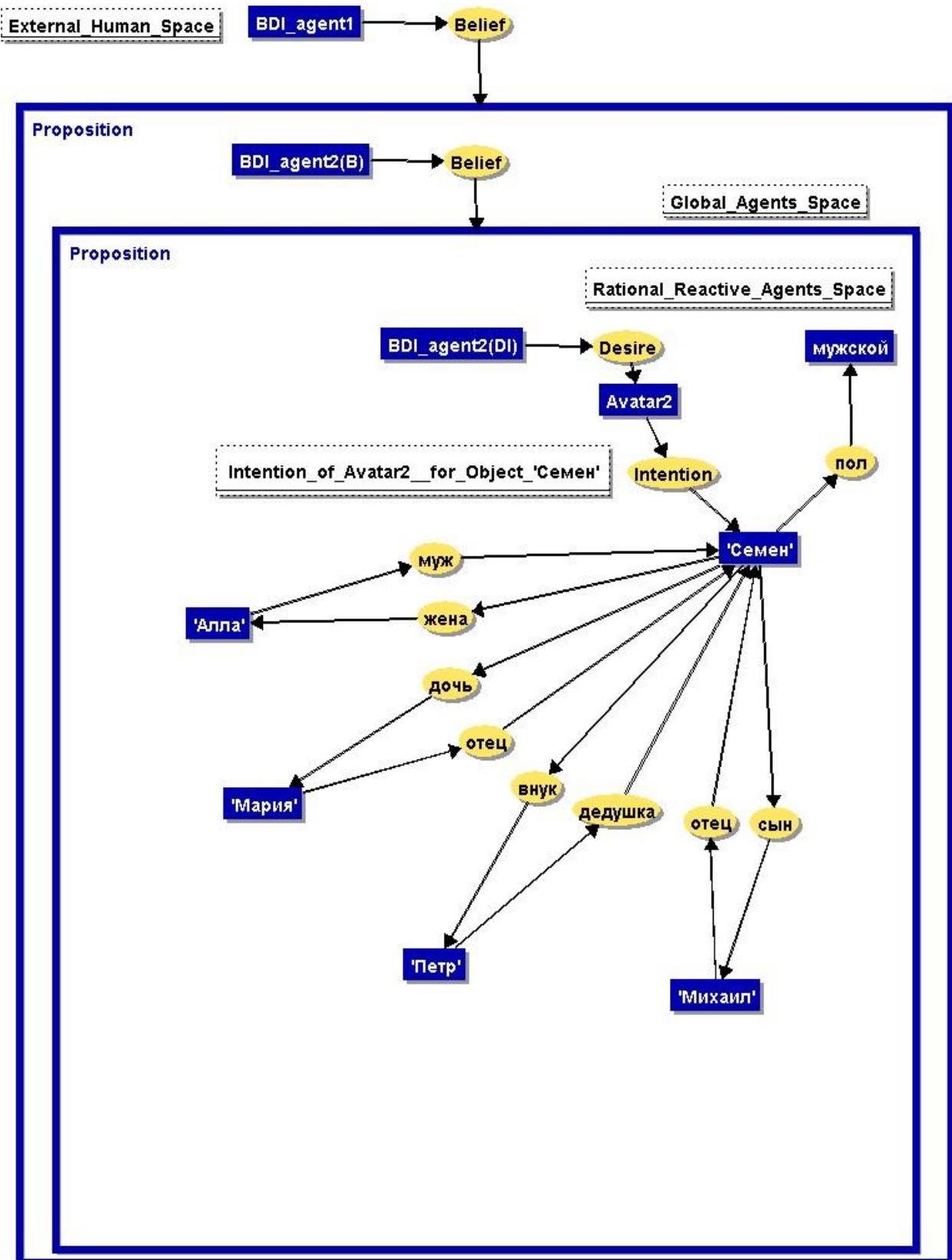


Рис. 3. Решение: результирующий концептуальный граф для персонажа 'Семен'

Fig. 3. Solution: Resulting conceptual graph for the character 'Semyon'

После того, как остальные агенты Avatar проделают указанные действия, будет получено полное решение – результирующий концептуальный граф на рис. 4 и найденные отношения для всех членов семейства *H*. Этот результат передается от когнитивного агента BDI_agent2 когнитивному агенту BDI_agent1 в виде следующего тернарного отношения *K*:

$$K \subset H' \times D' \times H',$$

представляющего собой точные знания (*knowledge* или *true_beliefs*). Агент BDI_agent1 получит возможность сравнения полученного состава отношений с теми отношениями, в существовании которых он был убежден ранее.

Например, будут даны отрицательные ответы на запросы о существовании отношений родства *племянница*, *внучка* и *тетя*, поскольку подобные отношения не могут быть получены путем дедуктивного вывода из имеющихся отношений, хотя правила вывода для них определены. Отрицательные ответы будут даны и на запросы о существовании отношений-свойств *шурин*, *зять*, *тесть*, *деверь* и *невестка* ввиду отсутствия соответствующих правил вывода отношений-свойств по условию задачи.

Если агент BDI_agent1 «узнает» об отсутствии этих правил, он может передать поручение (то есть свои *желание* и *намерение*) агенту BDI_agent2 подготовить дополнительные правила для последующих попыток дедуктивного вывода указанных отношений свойств на

основе уже полученных знаний об отношениях, отмеченных на концептуальном графе на рис. 4:

а) выводимо отношение шурин – брат жены:

правило: $\text{свойство_шурин}(Y, \text{шурин}, X): \neg(\text{рогство_жена}(Y, \text{жена}, Z); \text{рогство_жена1}(Y, \text{жена}, Z)), \text{рогство_брат1}(Z, \text{брат}, X);$

запрос к ЭБД и ИБД и ответ – отношение шурин выводимо:

? – $\text{свойство_шурин}(Y, W, X);$

$Y = \text{'Владимир'}, W = \text{шурин}, X = \text{'Михаил'},$

то есть Михаил является шурином Владимира;

б) выводимо отношение зять – муж дочери:

правило: $\text{свойство_зять}(Y, \text{зять}, X): \neg(\text{рогство_дочь}(Y, \text{дочь}, Z); \text{рогство_дочь1}(Y, \text{дочь}, Z)), (\text{рогство_муж}(Z, \text{муж}, X); \text{рогство_муж1}(Z, \text{муж}, X));$

запрос к ЭБД и ИБД и ответы – отношение зять выводимо:

? – $\text{свойство_зять}(Y, W, X);$

$Y = \text{'Семен'}, W = \text{зять}, X = \text{'Владимир'};$

$Y = \text{'Алла'}, W = \text{зять}, X = \text{'Владимир'},$

то есть Владимир является зятем для родителей его жены Марии: отца Семена и матери Аллы;

в) выводимо отношение тесть – отец жены:

правило: $\text{свойство_тесть}(Y, \text{тесть}, X): \neg(\text{рогство_жена}(Y, \text{жена}, Z); \text{рогство_жена1}(Y, \text{жена}, Z)), (\text{рогство_отец}(Z, \text{отец}, X); \text{рогство_отец1}(Z, \text{отец}, X));$

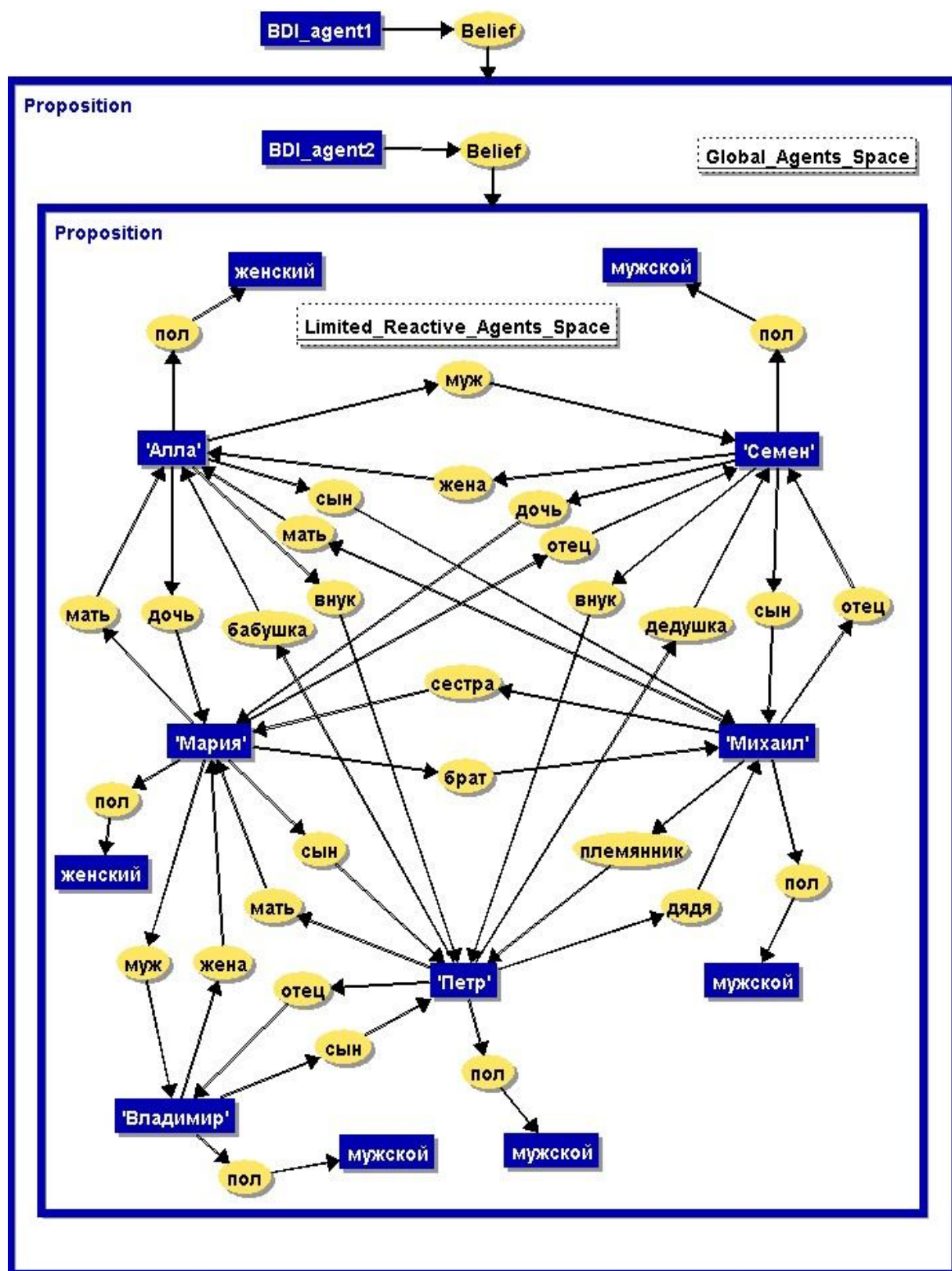


Рис. 4. Полное решение: результирующий концептуальный граф и найденные отношения для всех членов семейства *H*

Fig. 4. Complete solution: the resulting conceptual graph and the found relationships for all members of the *H* family

запрос к ЭБД и ИБД и ответ – отношение *тесть* выводимо:

? – `свойство_тесть(Y, W, X);`

$Y = \text{'Владимир'}, W = \text{тесть}, X = \text{'Семен'};$

г) отношение *деверь* – брат мужа не выводимо:

правило: `свойство_деверь(Y, деверь, X): – (рогство_муж(Y, муж, Z); рогство_муж1(Y, муж, Z)), рогство_брат1(Z, брат, X);`

запрос к ЭБД и ИБД и ответ *false* – отношение *деверь* не выводимо:

? – `свойство_деверь(Y, W, X);`
`false;`

д) отношение *невестка* – жена сына не выводимо:

правило: `свойство_невестка(Y, невестка, X): – (рогство_муж(X, муж, Z); рогство_муж1(X, муж, Z)), (рогство_сын(Y, сын, Z); рогство_сын1(Y, сын, Z));`

запрос к ЭБД и ИБД и ответ *false* – отношение *невестка* не выводимо:

? – `свойство_невестка(Y, W, X);`
`false.`

По завершении поиска этих отношений-свойств результат передается агенту `BDI_agent1` для последующего анализа и использования. При этом человеко-машинный `BDI_agent1` может обновить свои *убеждения* и *знания*. В общем случае приведенными отношениями родства и свойств список отношений не ограничивается, и его длина зависит от вида заданного концептуального графа, а также *знаний, убеждений, желаний и намерений* когнитивных BDI-агентов.

Выводы

Предложено и проиллюстрировано использование методологии BDI-PRS построения функциональной архитектуры агентно-базированной системы, предназначенной для когнитивного «агента-человека», то есть для инженера по знаниям или системного программиста, и которая отражает его основные действия по подготовке и анализу поручений, передаваемых реактивным агентам, реализующим дедуктивные выводы при пополнении базы знаний. При иллюстрации методологии BDI-PRS использовано представление знаний о предметной области концептуальными графами.

Резюмируя, отметим, что в проведенном исследовании показана важность BDI-логики для когнитивных агентов на уровне содержательно-концептуального описания. В расширенные функции когнитивных агентов входит выполнение операций ввода, регистрации, передачи и сопоставления списков объектов и отношений между ними. Программная реализация этих операций выполняется с применением обычных императивных языков программирования и возможно, языков манипулирования данными. Для реализации функций дедуктивных реактивных агентов при выполнении операций с семантическими сетями и концептуальными графами в большинстве случаев достаточно использовать возможности какого-либо языка декларативного и частично императивного языка типа Пролог, обладающего возможностью дедуктивного вывода.

Авторы работы полагают, что ее результаты могут быть распространены и на другие классы мультиагентных интеллектуальных систем на основе использования антропоморфных и нейроморфных эпистемических презумпций когнитивных агентов, таких как, например, *обязательства* (англ. *obligations*), *способность* (англ. *capability*), *решение* (англ. *decision*), *выбор* (англ. *choice*), *заключение* (англ. *commitment*), *согласование* (англ. *coordination*), *позиция* (англ. *attitude*) – отношение агента к окружающему миру. При программной агентно-ориентированной интерпретации данных презумпций на начальных стадиях проектирования интеллектуальных систем их имена использовать в качестве имен методов-процедур для агентов-объектов, рассматриваемых с позиций агентно-ориентированного или агентно-базированного программирования.

Постановка задачи настоящей работы инспирирована тем, что возможная интеграция существующей Всемирной паутины (World Wide Web) с Семантической паутиной (Semantic

Web) потребует наличия эффективных приемов и средств представления метаданных для работы с отношениями между сущностями¹. Все менее футуристическими становятся реализации идей по интеграции когнитивного Интернета вещей (CIoT – Cognitive Internet of Things) с Интернетом людей (IoP – Internet of People) [31].

Подобная интеграция может стать актуальной и для корпоративных приложений по типу геоинформационных и других систем [32, 33, 34], требующих усиления семантической составляющей модели представления знаний о предметной области. К числу важных задач может относиться и задача определения путем логического вывода недостающих отношений между сущностями (концептами) в семантической сети. Реализация подобной идеи во многом зависит от материализации концепции когнитивных и реактивных интеллектуальных агентов и потребует интеграцию функций браузера и редактора концептуальных графов в рамках одного и того же средства.

Список литературы

1. О программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базированных систем / Н.С. Карамышева, А.С. Милованов, М.А. Митрохин, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, № 1. С. 100-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-100-122>.

¹ Semantic Web. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Semantic_Web; Web 3.0 Explained, Plus the History of Web 1.0 and 2.0. Investopedia. Retrieved 2022-10-21. URL: <https://www.investopedia.com/web-20-web-30-5208698>; Semantic Web at W3C. URL: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>. 8 с.

2. Когнитивная пиринговая инфраструктура для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии / Н.С. Карамышева, В.С. Александров, И.А. Кирюткин, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 131-163. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-131-163>.
3. Маклаков А. Г. Общая психология. СПб.: Изд-во «Питер Пресс», 2017. 582 с.
4. Кулагина И. Ю., Коллюцкий В. Н. Психология развития и возрастная психология: полный жизненный цикл развития человека. М.: Академический проект, 2020. 420 с.
5. Психология / под общ. ред. В. Н. Дружинина. СПб.: Издательский дом «Питер», 2009. 652 с.
6. Холодная М.А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. СПб.: Питер, 2004. 384 с.
7. Лобанов А.П. Психология интеллекта и когнитивных стилей. Минск: Агентство В. Гревцова, 2008. 296 с.
8. Макаренко С. И., Соловьева О. С. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетевых систем // Журнал радиоэлектроники. 2021. №4. 24 с. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.10>.
9. Макаренко С.И. Справочник научных терминов и обозначений. СПб.: Научные технологии, 2019. 254 с.
10. Карамышева Н.С., Зинкин С.А. Взаимодействие когнитивных и реактивных агентов в интеллектуальной вычислительной системе: операционная семантика // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №4. С. 138-153. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-138-153>.
11. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic I: Modeling Knowledge and Belief // Philosophy Compass. 2013. Vol. 8, № 9. P. 798–814.
12. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic II: Logics of Information Change // Philosophy Compass. 2013. Vol. 8, № 9. P. 815–833.
13. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. Cambridge University Press, 2008. 532 p.
14. Wooldridge M. J. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley&Sons, 2009. 484 p.
15. Rao A. S., Georgeff M. P. BDI agents: From theory to practice // V. Lesser and L. Gasser, editors, Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'95), 12–14 June. San Francisco, CA., 1995. P. 312–319.
16. Hong Jiang, Vidal J. M., Huhns M. N. EBDI: An Architecture for Emotional Agents, 2007. URL: <http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/jiang07a.pdf/> (Free access. Access date: 12.06.2024).

17. Ali Orhan Aydın, Mehmet Ali Orgun. The Reactive-Causal Architecture: Radar Task Simulation // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2012. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/4/5.html>. (Free access. Access date: 12.06.2024).
18. Пантелеев М. Г. Логические модели интеллектуальных агентов. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 1-24. URL: https://vec.etu.ru/moodle/pluginfile.php/303181/mod_resource/content/1/Лекция_3.%20Логические%20модели%20ИА.pdf. (Режим доступа свободный. Просмотрено: 12.06.2024).
19. Карамышева Н. С., Зинкин С. А., Митрохин М. А. Методы и модели интеллектуализации вычислительных и киберфизических систем. Пенза: Изд-во ПГУ, 2022. 176 с.
20. Интеллектуальная обработка информации / М. А. Митрохин, Н. С. Карамышева, В. Ю. Егоров, С. А. Зинкин. Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. 320 с.
21. Sardina S. Padgham L. A BDI agent programming language with failure handling, declarative goals, and planning // *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2010. P. 1–53.
22. A formal specification of dMARS / M.D’Inverno, D. Kinny, M. Luck, M. Wooldridge // *Intelligent Agents IV Agent Theories, Architectures, and Languages*. 1998. P. 155–176.
23. Pokahr A., Braubach L., Lamersdorf W. Jadex: A BDI reasoning engine // *Multi-Agent Programming*. 2005. P. 149–174.
24. Bordini R., Hübner J., Wooldridge M. Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason. Wiley-Interscience. 2007.
25. Autonomous Decision-Making Software. 2010. URL: <http://www.aosgrp.com.au> [Accessed: May 30, 2024].
26. Grabovskis A., Grundspenkis J. Identification of Relations between BDI Logic and BDI Agents // *Computer Science. Applied Computer Systems. Scientific Journal of Riga Technical University*. 2011. Vol. 44. P. 21-28. DOI: 10.2478/v10143-011-0018-1.
27. Лисанюк Е. Н. Когнитивные характеристики агентов аргументации // *Вестн. СПбГУ*. 2013. Сер. 6. Вып. 1. С. 13–21.
28. Лисанюк Е. Н., Павлова А. М. Логические аспекты многообразия агентов // *Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление*. 2016. Т. 11. № 4. С. 45-60.
29. Залогова Л.А. Формальное описание логического вывода в Прологе // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2014. Вып. 4(27). С. 84–91.
30. Тюрин С. Ф., Городилов А. Ю. Особенности логического вывода в Пролог-программах // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2019. Вып. 3 (46). С. 91-97. DOI: 10.17072/1993-0550-2019-3-91-97.
31. From the Internet of Things to the Internet of People / J. Miranda, N. Makitalo, J. Garcia-Alonso, J. Berrocal, T. Mikkonen, C. Canal, J. Murillo // *IEEE Internet Computing*. Vol. 19, no 2. P. 40-47.

32. Hitzler P. A Review of the Semantic Web Field // Communications of the ACM. 2021. Vol. 64, no. 2. P. 76–83. DOI:10.1145/3397512.

33. Unni D. FAIRification of health-related data using semantic web technologies in the Swiss Personalized Health Network // Scientific Data. 2023. Vol. 10, no. 1. DOI:10.1038/s41597-023-02028-y.

34. Zhang Chuanrong, Zhao Tian, Li Weidong. Geospatial Semantic Web. Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 189 p. DOI:10.1007/978-3-319-17801-1.

References

1. Karamysheva N. S., Milovanov A. S., Mitrokhin M. A., Zinkin S. A. On the Software Implementation of Cognitive Interoperable Agent-Based Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 100-122 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-100-122>.

2. Karamysheva N. S., Alexandrov V. S., Kiryutkin A.I., Zinkin S. A. Cognitive peering infrastructure for the organization teamwork on projects based on agile methodology. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 131-163 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-131-163>.

3. Maklakov A. G. General psychology. St. Petersburg: Piter Press; 2017. 582 p. (In Russ.).

4. Kulagina I. Yu., Kolyuckij V. N. Developmental psychology and age psychology: the full life cycle of human development. Moscow: Akademicheskij proekt; 2020. 420 p. (In Russ.).

5. Druzhinin V. N., ed. Psychology. St. Petersburg: Piter; 2009. 652 p. (In Russ.).

6. Kholodnaya M.A. Cognitive styles. On the nature of the individual mind. St. Petersburg: Piter; 2004. 384 p. (In Russ.).

7. Lobanov A.P. Psychology of intelligence and cognitive styles. Minsk: Agentstvo V. Grevtsova; 2008. 296 p. (In Russ.).

8. Makarenko S.I., Solovyova O.S. Basic provisions of the concept of semantic interoperability of network-centric systems. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*. 2021. (4):24. (In Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.10>.

9. Makarenko S.I. Directory of scientific terms and notations. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2019. 254 p. (In Russ.).

10. Karamysheva N. S., Zinkin S. A. Interaction of cognitive and reactive agents in an intelligent computing system: operational semantics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(4): 138-153 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-138-153>.

11. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic I: Modeling Knowledge and Belief. *Philosophy Compass*. 2013. 8(9): 798–814.
12. Pacuit E. Dynamic Epistemic Logic II: Logics of Information Change. *Philosophy Compass*. 2013. 8(9): 815–833.
13. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. Cambridge University Press; 2008. 532 p.
14. Wooldridge M. J. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley&Sons; 2009. 484 p.
15. Rao A. S., Georgeff M. P. BDI agents: From theory to practice. In: *V. Lesser and L. Gasser (eds), Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'95), 12–14 June*. San Francisco, CA.; 1995. P. 312–319.
16. Hong Jiang, Vidal J. M., Huhns M. N. EBDI: An Architecture for Emotional Agents, 2007. Available at: <http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/jiang07a.pdf/>.
17. Ali Orhan Aydın, Mehmet Ali Orgun. The Reactive-Causal Architecture: Radar Task Simulation // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2012. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/4/5.html>.
18. Panteleev M. G. Logical models of intelligent agents. *SPbGETU «LETI»*, 2022. P. 1–24. (In Russ.). Available at: https://vec.etu.ru/moodle/pluginfile.php/303181/mod_resource/content/1/Lecture_3/ (Accessed 12.06.2024).
19. Karamysheva N. S., Zinkin S. A., Mitrohin M. A. Methods and models of intellectualization of computing and cyber-physical systems. Penza: Izd-vo PGU; 2022. 176 p. (In Russ.).
20. Mitrohin M. A., Karamysheva N. S., Egorov V. Yu., Zinkin S. A. Intelligent information processing. Penza: Izd-vo PGU; 2023. 320 p. (In Russ.).
21. Sardina S. Padgham L. A BDI agent programming language with failure handling, declarative goals, and planning. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2010. P. 1–53.
22. D’Inverno M., Kinny D., Luck M., Wooldridge M. A formal specification of dMARS. *Intelligent Agents IV Agent Theories. Architectures, and Languages*. 1998. P. 155–176.
23. Pokahr A., Braubach L., Lamersdorf W. Jadex: A BDI reasoning engine. *Multi-Agent Programming*. 2005. P. 149–174.
24. Bordini R., Hübner J., Wooldridge M. Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason. Wiley-Interscience. 2007.
25. Autonomous Decision-Making Software. <http://www.aosgrp.com.au>, 2010. Available: <http://www.aosgrp.com.au> (Accessed 30 May 2024).
26. Grabovskis A., Grundspenkis J. Identification of Relations between BDI Logic and BDI Agents. *Computer Science. Applied Computer Systems. Scientific Journal of Riga Technical University*. 2011. (44): 21–28. DOI: 10.2478/v10143-011-0018-1.

27. Lisanyuk E. N. Cognitive characteristics of agents of argumentation. *Vestnik SPbGU. Ser. 6. Vyp. 1. = Bulletin St. Petersburg State University*. 2013; 6 (1): 13–21 (In Russ.).
28. Lisanyuk E. N., Pavlova A. M. Logical aspects of the diversity of agents. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Bulletin of UrFU. Series: Economics and management*. 2016; 11(4): 45–60 (In Russ.).
29. Zalogova L.A. Formal Description of Logical Inference in Prolog. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer science*. 2014; 4: 84–91 (In Russ.).
30. Tyurin S. F., Gorodilov A. Yu. Features of logical inference in Prolog programs. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer science*. 2019; 3: 91–97. (In Russ.). DOI: 10.17072/1993-0550-2019-3-91-97.
31. Miranda J., Makitalo N., Garcia-Alonso J., Berrocal J., Mikkonen T., Canal C., Murillo J. From the Internet of Things to the Internet of People. *IEEE Internet Computing*. 19(2): 40–47.
32. Hitzler P. A Review of the Semantic Web Field. *Communications of the ACM*. 2021; 64(2):76–83. DOI:10.1145/3397512.
33. Unni D. FAIRification of health-related data using semantic web technologies in the Swiss Personalized Health Network. *Scientific Data*. 2023; 10(1). DOI:10.1038/s41597-023-02028-y.
34. Zhang Chuanrong, Zhao Tian, Li Weidong. Geospatial Semantic Web. Springer International Publishing: Imprint: Springer; 2015. 189 p. DOI:10.1007/978-3-319-17801-1.

Информация об авторах / Information about the Authors

Карамышева Надежда Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: karamyshevans@yandex.ru

Nadezhda S. Karamysheva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: karamyshevans@yandex.ru

Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: zsa49@yandex.ru

Sergey A. Zinkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: zsa49@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-79-95>

Модели и алгоритм анализа реестра должников энергосбытовой компании на основе low-code платформы Loginom

Ю. И. Серова ¹, А. А. Ханова ¹ ✉, Т. Г. Гурская ²

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

¹ Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева
ул. Татищева, д. 20а, г. Астрахань 414025, Российская Федерация

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Анализ системных взаимосвязей и выявление закономерностей между характеристиками абонента энергосбытовой компании и суммой его дебиторской задолженности на основе моделей анализа данных и инструментария low-code платформы Loginom.

Методы. Приведена классификация направлений анализа дебиторской задолженности в энергосбытовых компаниях. Показано, что исследование ситуаций дебиторской задолженности в контексте состояния организации и отдельного должника возможно на основе данных учетной системы. Для детального анализа реестра должников необходима консолидация данных об абонентах, об оплатах, а также об объектах гражданского права. Обоснован выбор методов анализа реестра должников энергосбытовой компании. Описан процесс создания портрета должника. Выявлены проблемы исходных данных. Сформулированы требования к технологиям и инструментарию для автоматизации аналитических процессов.

Результаты. Разработан сценарий обработки данных на основе low-code платформы Loginom, включающий 6 логических блоков (заметок) и 2 подмодели. Подмодель «Редактирование выбросов» предназначена для повышения качества исходных данных. Подмодель «Портрет должника» на основе корреляционного анализа и кластеризации данных помогает получить сведения для составления портрета должника. С помощью кластерных силуэтов предложено оценить качество построенной модели «портрет должника». С использованием обработчика ABC-анализ проведено ранжирование абонентов с низкой платежной дисциплиной на категории. Построены аналитические процессы принятия управленческих решений в отношении должников энергосбытовой компании.

Заключение. Разработан алгоритм аналитического процесса работы с должниками энергосбытовой компании. Реализована информационно-аналитическая система «Анализ должников» на основе low-code платформы Loginom. Реализован инструментарий для принятия управленческих решений на основе результатов анализа реестра должников.

Ключевые слова: реестр должников; портрет должника; анализ данных; энергосбытовая компания; управленческие решения; low-code; ABC-анализ; кластеризация; корреляционный анализ.

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

Для цитирования: Серова Ю. И., Ханова А. А., Гурская Т. Г. Модели и алгоритм анализа реестра должников энергосбытовой компании на основе low-code платформы Loginom // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 79-95. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-79-95>.

Поступила в редакцию 16.12.2024

Подписана в печать 30.01.2025

Опубликована 14.04.2025

Models and algorithm for analyzing the register of debtors of an energy supply company based on the Loginom low-code platform

Yuliya I. Serova ¹, Anna A. Khanova ¹ ✉, Tatyana G. Gurskaya ²

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

² Astrakhan State Technical University named after V.N. Tatishchev
20a Tatishcheva str., Astrakhan 414025, Russian Federation

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Analysis of system relationships and identification of patterns between the characteristics of a subscriber of an energy supply company and the amount of his receivables based on data analysis models and tools of the Loginom low-code platform.

Methods. A classification of areas for the analysis of accounts receivable in power supply companies is given. It is shown that the study of accounts receivable situations in the context of the state of the organization and an individual debtor is possible on the basis of the data of the accounting system. For a detailed analysis of the register of debtors, it is necessary to consolidate data on subscribers, payments, as well as on objects of civil law. The choice of methods for analyzing the register of debtors of an energy supply company is substantiated. The process of creating a portrait of debtors is described. Problems of the initial data are revealed. The requirements for technologies and tools for the automation of analytical processes are formulated.

Results. A data processing scenario based on the low-code Loginom platform has been developed, which includes 6 logical blocks (notes) and 2 submodels. The Outlier Editing submodel is designed to improve the quality of the source data. The "Debtor Portrait" submodel based on correlation analysis and data clustering helps to obtain information for compiling a debtor portrait. With the help of cluster silhouettes, it is proposed to assess the quality of the constructed model "portrait of the debtor". Using the ABC analysis handler, subscribers with low payment discipline were ranked into categories. Analytical processes for making management decisions in relation to debtors of an energy supply company have been built.

Conclusion. An algorithm for the analytical process of working with debtors of an energy supply company has been developed. The information and analytical system "Debtor Analysis" based on the Loginom low-code platform was implemented. Tools for making management decisions based on the results of the analysis of the register of debtors have been implemented.

Keywords: register of debtors; debtor portrait; data analysis; energy supply company; management decisions; low-code; ABC analysis; clustering; correlation analysis.

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

For citation: Serova Y. I., Khanova A. A., Gurskaya T. G. Models and algorithm for analyzing the register of debtors of an energy supply company based on the Loginom low-code platform. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 79-95 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-79-95>.

Received 16.12.2024

Accepted 30.01.2025

Published 14.04.2025

Введение

Важным элементом оптового рынка электрической энергии (э/э) и мощности Единой энергетической системы (ЕЭС) России являются энергосбытовые компании, которые осуществляют продажу э/э по договорам и тарифам различным организациям, физическим и юридическим лицам непосредственно, а также по государственным тарифам через жилищно-коммунальные хозяйства (ЖКХ) (рис. 1) [1]. В России на жилые здания и предприятия отрасли строительства и ЖКХ приходится почти четверть потребления энергоресурсов [2]. Цены на э/э для физических лиц определяются региональными тарифами, которые устанавливаются правительством один раз в год и не меняются. Цена же для юридических лиц не регулируется и может меняться каждый день [3].

Конечная цена на э/э для населения определяется факторами, представленными на рис. 2, а также перекрестным субсидированием – ценовой дискриминации потребителей, предназначенной для сдерживания роста тарифов, предполагающей установление для одной группы потребителей цен, превышающих предельные издержки, а для другой – ниже предельных издержек, что в целом приводит к ценам, равным средним издержкам [4]. Деятельность энергосбытовых компаний характеризуется практически полным отсутствием внеоборотных активов в балансе. Основной частью оборотных активов является дебиторская задолженность потребителей э/э [4]. По состоянию на 21 ноября 2024 года общая задолженность участников рынка составила 66,668 млрд рублей [5].

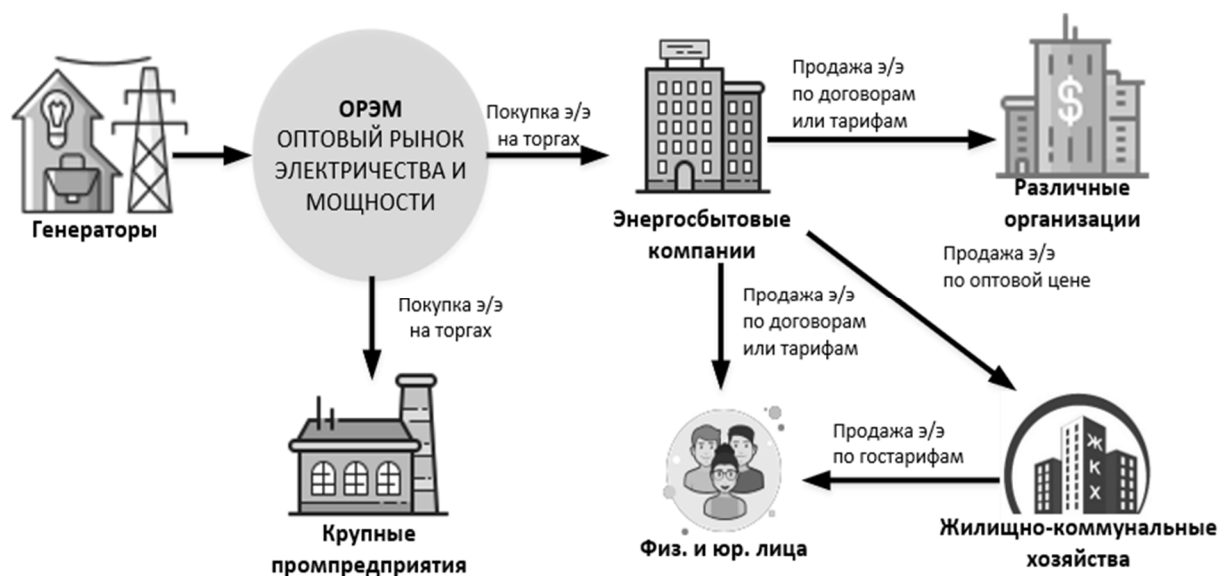


Рис. 1. Структура оптового рынка электрической энергии и мощности

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

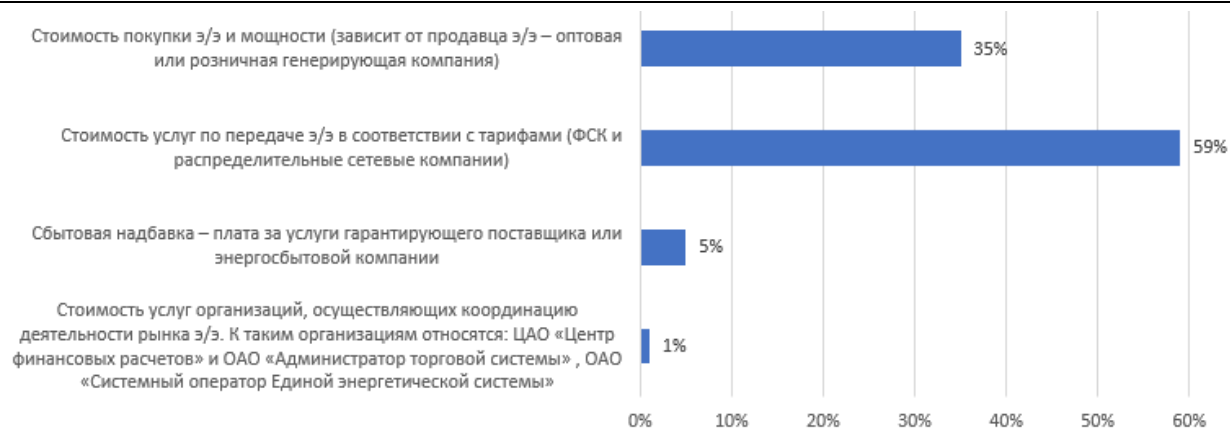


Рис. 2. Факторы ценообразования электрической энергии для населения

Fig. 2. Factors of electricity pricing for the population

Исследование общей ситуации дебиторской задолженности по организации можно отнести к группе отчетов, составленных на основе бухгалтерского учета, который компании автоматизируют в первую очередь. На август 2023 года доля продуктов компании «1С», по разным оценкам, занимала от 60 до 70% [6]. Работу с должниками, а также исследование ситуации задолженности по каждому абоненту в энергосбытовой компании, можно частично автоматизировать с помощью подсистемы 1С:Учет в управляющих компаниях ЖКХ, ТСЖ и ЖСК¹. Анализ данных реестра должников, выгруженных из этой подсистемы, дает представление о критичности дебиторской задолженности, но не позволяет вычислить расширенные характеристики среднестатистического должника («портрет должника»). Большинство научных работ на тему анализа реестра должни-

ков посвящены анализу влияния дебиторской задолженности на финансовое состояние компании [7-8] и выявлению методов управления дебиторской задолженностью [9-10]. Формирование «портрета» должника, проведение дополнительных аналитических исследований позволит разрабатывать меры по урегулированию дебиторской задолженности [11], предпринимать опережающие действия в отношении потенциальных должников, например, учащать проверки счетчиков в определенных районах. Цель работы – анализ системных взаимосвязей и выявление закономерностей между характеристиками абонента энергосбытовой компании и суммой его дебиторской задолженности.

Материалы и методы

В области анализа ситуации по дебиторской задолженности в организации можно условно выделить три направления исследования: исследование общей ситуации дебиторской задолженности в контексте влияния на финансовое состо-

¹ 1С:Предприятие 8. Конфигурация «Учет в управляющих компаниях ЖКХ, ТСЖ и ЖСК». Ред. 3.0. Руководство пользователя. Издание 3. М.: Фирма "1С", 2024. 768 с.

яние организации (1); исследование реестра должников для выявления закономерностей и облегчения принятия эффективных управленческих решений (2); исследование ситуации каждого отдельного должника для выявления более эффективного метода работы с ним (3) (рис. 3) [12, 13].

Учетная подсистема 1С:Учет в управляющих компаниях ЖКХ, ТСЖ и ЖСК позволяет сотруднику ЖКХ провести абонента через полный цикл взыскания долга, начиная с формирования предупреждения, заканчивая формированием исковых заявлений и судебных соглашений (рис. 4).



Рис. 3. Классификация направлений анализа дебиторской задолженности

Fig. 3. Classification of the areas of analysis of accounts receivable



Рис. 4. Схема работы с должниками в учетной системе

Fig. 4. Scheme of working with debtors in the accounting system

Имеющийся набор условий отбора должников и отчеты по абонентам с низкой платежной дисциплиной позволяют контролировать ситуацию с задолженностью абонента, а также следить за эффективностью работников (юристов), фактически позволяя детально рассмотреть направления (1) и (3) анализа ситуации по дебиторской задолженности (см. рис. 3). Из схемы работы с должниками (см. рис. 4) видно, что система имеет существенный недостаток – она не предназначена для анализа собранной информации и обобщения результатов. Однако для ЖКХ данная информация является необходимой. Для детального анализа реестра должников, помимо самого реестра должников необходимы данные об абонентах, данные об оплатах, а также данные об объектах гражданского права. Эти данные хранятся энергосбытовой компанией в системе 1С: Биллинг и позволяют реализовать

направление (2) анализа ситуации по дебиторской задолженности (см. рис. 3).

При проектировании системы анализа реестра должников необходимо учитывать следующие аспекты: 1) наличие информационной базы абонентов отделения энергосбытовой компании, данных о субъектах гражданского права, реестра должников и информации об оплате; 2) применение методов проверки и повышения качества данных; 3) применение методов анализа данных [14]; 4) использование соответствующего программного обеспечения.

Анализ методов анализа данных позволил разработать иерархию направлений и методов для анализа реестра должников и составления портрета должника: АВС-анализ, корреляционный анализ, кластеризация и фильтрация (рис. 5).

Метод АВС-анализа, позволяющий упорядочивать оцениваемые объекты, основан на эмпирическом правиле Парето.



Рис. 5. Иерархия направлений и методов анализа

Fig. 5. Hierarchy of directions and methods of analysis

В применении к рассматриваемой предметной области правило Парето трактуется, что 80% суммы задолженности приходится на 20% абонентов. При оценке дебиторской задолженности ABC-анализ позволяет ранжировать абонентов энергосбытовой компании в порядке убывания значимости их долга [15].

Корреляционный анализ применяется для оценки силы связи между случайными величинами (признаками), характеризующими некий реальный процесс [16]. Результатом корреляционного анализа является коэффициент корреляции – самым распространенным является коэффициент Пирсона. Коэффициент принимает значение от -1 до 1, где -1 отражает обратную связь, а 1 – прямую [17].

Кластерный анализ применяется для разделения множества объектов на кластеры, т.е. однородные группы. На основании результатов кластерного анализа возможно сформировать описание среднестатистического должника одной из категорий – портрет должника. Каждый кластер представлен силуэтом, который показывает, какие объекты находятся в пределах своего кластера, а какие располагаются между кластерами. Вся кластеризация отображается путем объединения силуэтов в единый график, что позволяет оценить качество проведенной кластеризации [18].

На рынке присутствует множество программных инструментов анализа. Од-

ним из самых популярных и простых для пользователя является MS Excel. Для мелкого бизнеса данный программный инструмент является хорошим выбором. Но для компаний с большим количеством данных, таких как энергосбытовые компании, вести аналитику в MS Excel трудно. Среди языков программирования в сфере анализа данных популярностью пользуется Python. Для Python написано множество библиотек, с помощью которых можно упростить написания кода для анализа данных и дальнейшей визуализации результата: NumPy, SciPy, Matplotlib, Pandas, Scikit Learn, Statsmodels, Seaborn, SymPy [19]. Недостатком Python, как и других языков программирования, являются более высокие требования к квалификации сотрудников.

Оптимальным решением для крупных компаний являются low-code платформы [20]. Среди множества low-code платформ, внесенных в реестр российских программ, была выбрана аналитическая low-code платформа Loginom [21]. На основе рассмотренных методов анализа разработан алгоритм работы информационной системы (ИС) «Анализ реестра должников» (рис. 6).

Наборы данных в систему интеллектуального анализа данных Loginom поступают из системы 1С: Биллинг, содержащие информацию об абонентах, данные о субъектах гражданского права, реестр должников, а также данные о поступивших платежах.

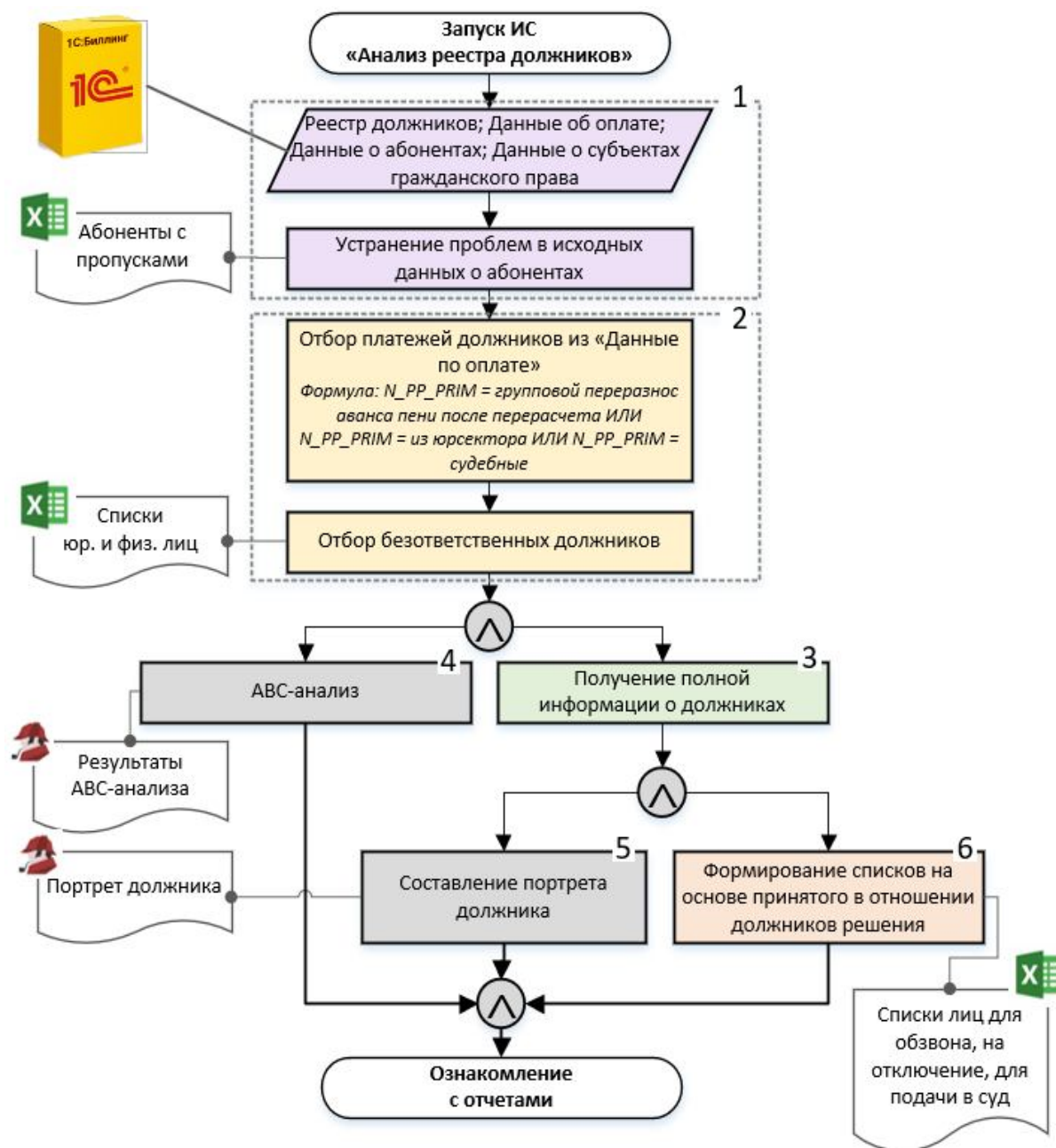


Рис. 6. Алгоритм работы ИС «Анализ реестра должников»

Fig. 6. Algorithm of the information system "Analysis of the Register of Debtors"

Результаты и их обсуждение

Базовый сценарий информационной системы «Анализ реестра должников» в low-code системе Loginom содержит 6 заметок (логических блоков), выделенных различными цветами (рис. 7). Заметки соответствуют аналитическим процес-

сам обработки информации, представленным в виде алгоритма на рис. 6. Кроме того, рассматриваемый сценарий содержит 2 подмодели – «Портрет должника» и «Редактирование выбросов».

Процесс анализа реестра должников начинается с устранения в исходных данных таких проблем, как про-

пуски и выбросы. Абоненты, в данных о которых имеются пропуски, выгружаются в отдельный Excel-документ, сами же пропуски для проведения даль-

нейшего анализа заполняются медианами, вычисленными по столбцу (рис. 6, 7, заметка 1).

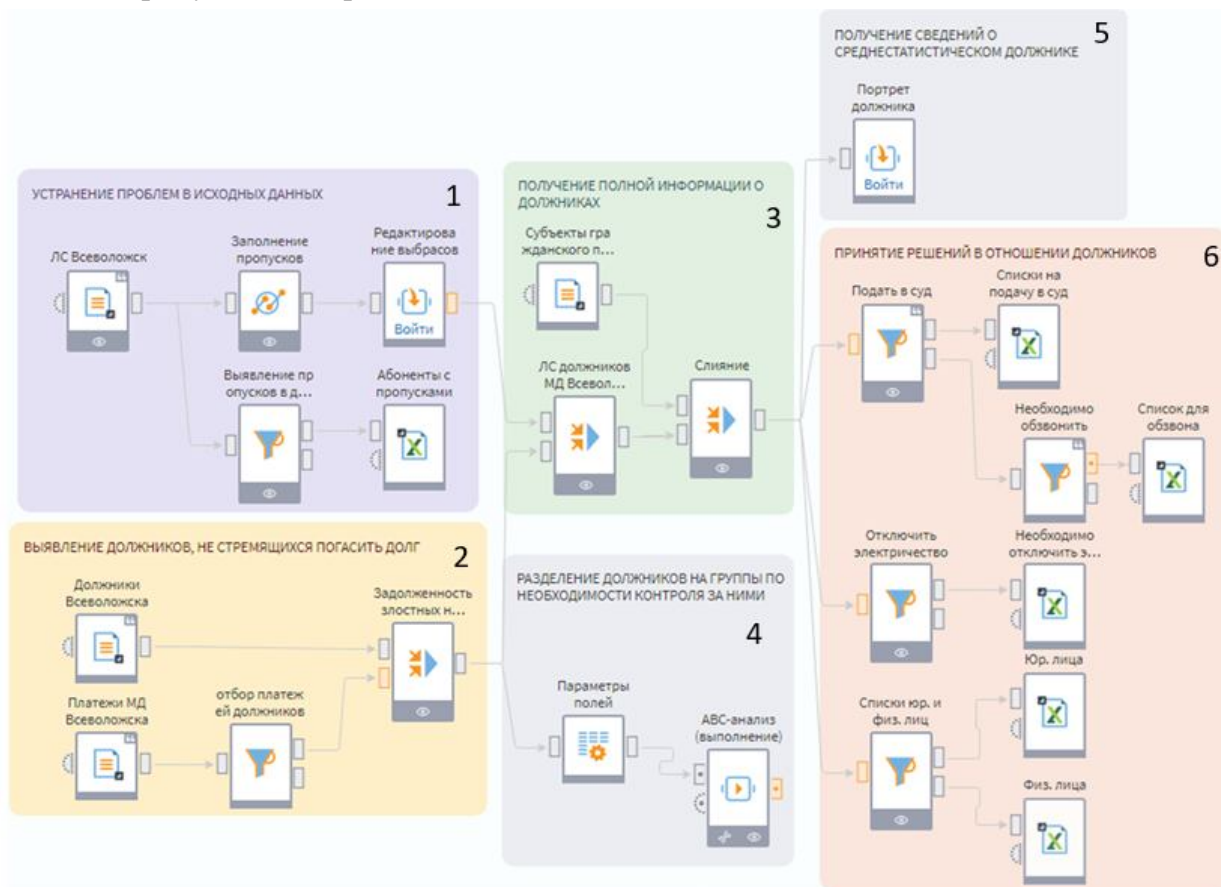


Рис. 7. Базовый сценарий анализа реестра должников в Loginom

Fig. 7. The basic scenario for analyzing the register of debtors in Loginom

Задача устранения выбросов, присутствующих в полях, содержащих данные о площади квартиры, количестве прописанных и количестве проживающих, решается в подмодели «Редактирование выбросов» (рис. 8, а).

Далее из всех поступивших платежей выбираются платежи оплаты задолженности. Для этого в узле фильтрации «Отбор платежей должников» прописываются условия (рис. 6,7, заметка 2). После чего при помощи узла Объединения «ЛС должников МД Всеволожска» вы-

бираются данные о должниках, оплата от которых не поступала более N месяцев, например $N = 3$ (рис. 6,7, заметка 3).

Задолженности абонентов с низкой платежной дисциплиной на основе ABC-анализа ранжируются на три категории: *A* – за которыми требуется регулярный мониторинг; *B* – которым необходимо периодически напоминать о задолженности; *C* – которым нужно сообщить о долге только один раз (рис. 6,7, заметка 4). Результаты ABC-анализа представлены на (рис. 9, а).

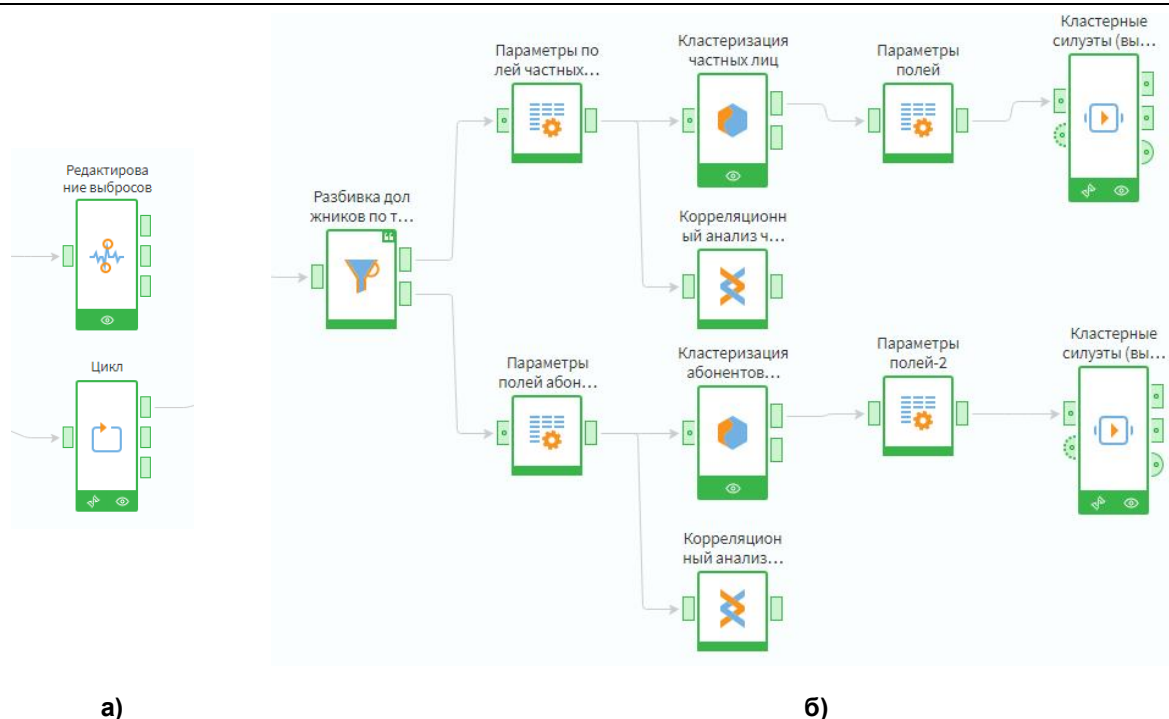


Рис. 8. Сценарии подмоделей: а – «Редактирование выбросов»; б – «Портрет должника»

Fig. 8. Sub-model scenarios: а – "Outlier editing"; б – "Portrait of the debtor"

	Показатель		
	Σ Сумма	# Количество	$\bar{x}$ Среднее
A	260 445 860,89	6 479	40 198,47
B	48 840 032,07	2 418	20 198,52
C	16 290 908,87	13 650	1 193,47
Итого:	325 576 801,83	22 547	14 439,92

#	ab Поле1.И...	ab Поле1.Метка	ab Поле2.И...	9.0 Пирсона
1	KOL_PROP	KOL_PROP	SALDO	0,03
2	KOL_PROG	KOL_PROG	SALDO	0,03
3	KOL_KOM	KOL_KOM	SALDO	0,01
4	VIDBLAG_EP	VIDBLAG_EP	SALDO	-0,01
5	S_KOMNAT	S_KOMNAT	SALDO	0,02
6	SCL	Субъекты гр права	SALDO	0,57
7	VIDBLAG_EO	VIDBLAG_EO	SALDO	

Рис. 9. Результаты анализа: а – ABC-анализ; б – корреляционный анализ

Fig. 9. Analysis results: а – ABC analysis; б – correlation analysis

Данные о должниках, дополненные в узле слияния сведениями о виде субъекта гражданского права, являются данными, подаваемыми на вход подмодели «Портрет должника» (рис. 6,7, заметка 5). Детально сценарий обработки данных подмодели «Портрет должника» представлен на рис. 8, б. В подмодели происходит раздельный анализ лиц, заключивших договор непосредственно с

энергосбытовой компанией, и абонентов, заключающих договор с ЖКХ.

Корреляционный анализ подмодели «Портрет должника» необходим для определения зависимости суммы долга от характеристик абонента (рис. 9, б), где KOL_PROP (кол-во прописанных в помещении), KOL_PROG (кол-во проживающих в помещении), KOL_KOM (кол-во комнат в помещении, VIDBLAG_EP

(наличие электро-плиты), S_KOMNAT (площадь помещения), SCL (вид субъекта гражданского права) VIDBLAG_EO (наличие электро-отопления) – характеристики, влияющие на сумму долга.

На основе результатов корреляционного анализа настраивается и проводится кластеризация частных лиц (рис. 10). С помощью визуализатора «Куб» (рис. 10, а) в узле кластеризации показана общая ситуация по задолженности в разрезе количества должников, их общей и средней суммы задолженности. С помощью узла Кластеризация абонентов и визуализатора «Профили кластеров» формируются кластеры из должников, основываясь на характеристиках, влияющих на сумму долга (рис. 10, б). Например, среднестатистический должник, заключивший договор непосредственно с компанией, кластера 0 – физ.

лицо, сумма задолженности которого не превышает 30 926 руб. проживающий один или с одним сожителем, в квартире которого прописано максимум 4 человека. Это может быть квартирант, молодая семья или семья, у которой есть взрослые дети, которые больше не живут с родителями. Среднестатистический должник кластера 1 – юр. лицо, средняя сумма задолженности которого составляет 37 114 руб., в квартире которого могут быть прописаны и жить до 6 человек. Это могут быть, например, владельцы апартаментов.

Качество проведенной кластеризации оценивается в соответствующем порте узла «Кластерные силуэты». Для визуальной оценки кластеризации используется визуализатор «Кластерные силуэты» (рис. 11).

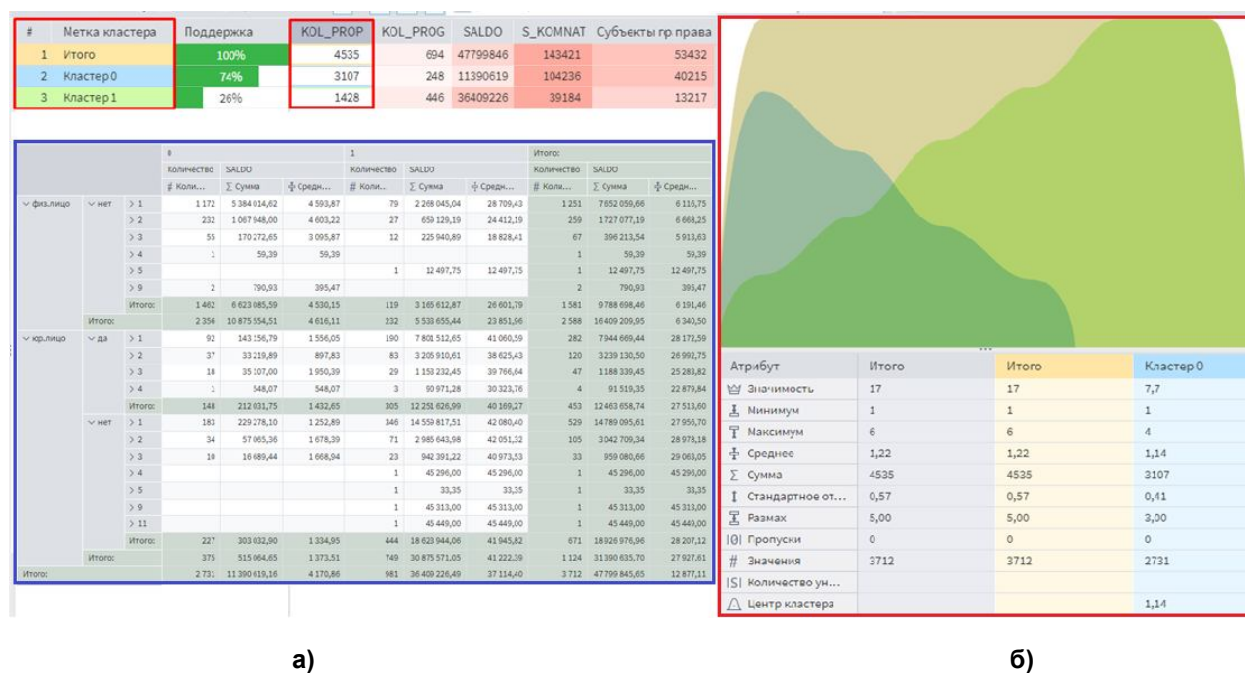


Рис. 10. Визуализаторы «Кластеризация частных лиц»: а – «Куб»; б – «Профили кластеров»

Fig. 10. Visualizers "Clustering of individuals": а – "Cube"; б – "Cluster profiles"

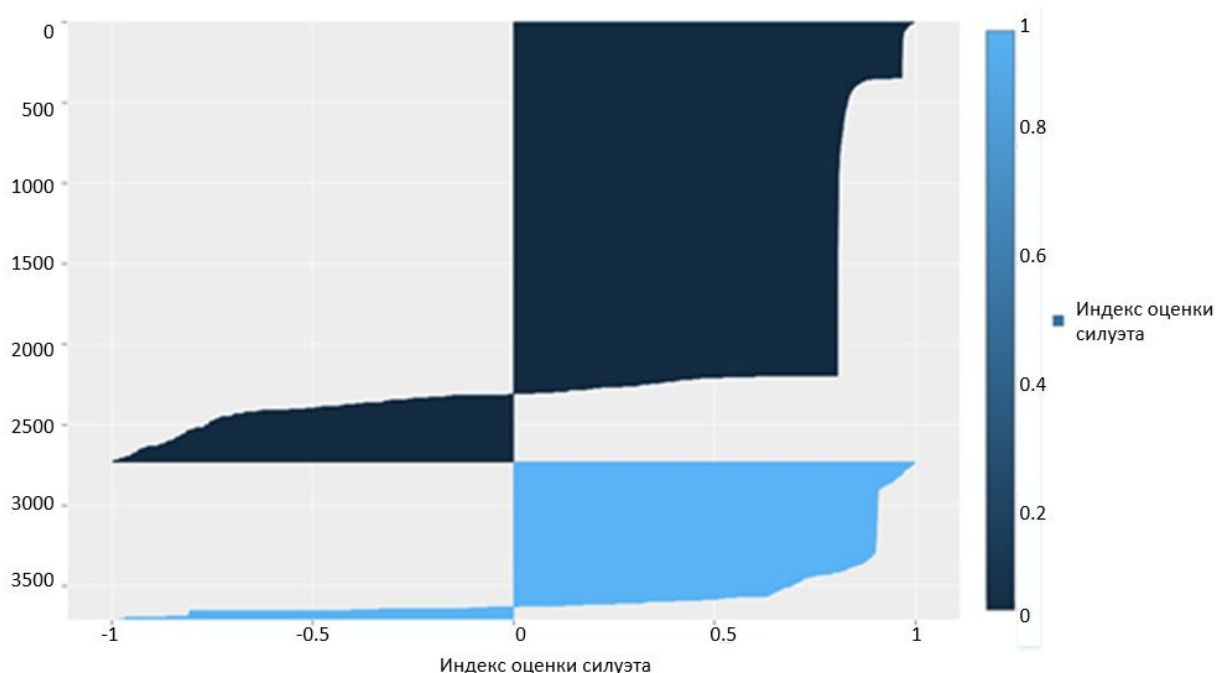


Рис. 11. Кластерные силуэты частных лиц, визуализатор «Кластерные силуэты» в Loginom

Fig. 11. Cluster silhouettes of individuals, visualizer "Cluster silhouettes" in Loginom

Процесс принятия управленческих решений в отношении должников показан на рис. 6, 7, заметка 6. Часть должников имеют большую задолженность и не предпринимают попыток погасить долг. В таких случаях при долге свыше K руб. компания отключает подачу э/э. Если после отключения э/э долг не погашен и продолжает расти, энергосбытовая компания имеет право подать в суд на неплательщика. Полученные данные выгружаются в Excel-документ «Списки абонентов для подачи в суд». Для формирования списка должников, которым следует напомнить о задолженности, добавляется узел фильтрации «Необходимо обзвонить». Сформированный список экспортируется в Excel-документ «Список абонентов для обзвона» для дальнейшей передачи в отдел аудита энергопотребителей. Для руководства

компании могут понадобиться отдельные списки должников физ. и юр. лиц. Для этого настраивается узел фильтрации «Списки юр. и физ. лиц». Лица, удовлетворяющие условию, экспортируются в Excel-документ «Юр_лица_Должники» с помощью узла экспорта «Юр. лица». Лица, не удовлетворяющие условию, экспортируются в Excel-документ «Физ_лица_Должники» с помощью узла экспорта «Физ. лица».

Выводы

В статье рассмотрены направления и методы анализа реестра должников энергосбытовых компаний. Предложен алгоритм аналитических процессов работы с реестром должников компаний, а также детально описаны сценарии обработки и анализа данных на базе low-code платформы Loginom. Представлены разрабо-

танные визуализаторы, сформированы сценарии принятия управленческих решений. Внедрение представленной ИС, позволит увеличить оперативность поиска должников с низкой платежной дисциплиной, а также составления списков должников разных категорий (для обзвона, на отключение подачи электроэнергии, для подачи в суд), обеспечит кон-

троль над ситуацией каждого должника, составит портрет должника для принятия более успешных управленческих решений. Все вышеперечисленные факторы повысят качество обслуживания абонентов за счет увеличения бюджета, а следовательно, и их лояльность, что в свою очередь положительно скажется на имидже энергосбытовой компании.

Список литературы

1. Оптовый рынок электрической энергии и мощности. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm>.
2. Трунова Н. Энергоэффективность жилья // Бюллетень Счетной палаты РФ. 2023. № 8 (309). 138 с.
3. По кривой - к балансу. Как складывается цена электроэнергии. URL: <https://sibgenco.online/news/element/on-a-curve-to-balance-what-is-the-price-of-electricity-/>.
4. Алуян С.В., Катити А.А. Энергосбытовая отрасль России: специфика и экономические особенности // Экономика, бизнес, инновации: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 10 декабря 2018 г. Пенза, 2018. С. 153-158. EDN SVQGHW.
5. Итоги работы оптового рынка электроэнергии и мощности с 19.11.2024 по 25.11.2024. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/press/news/62932-itogi-raboty-optovogo-rynka-elektroenergii-i-moshchnosti-s-19112024-po-25112024>.
6. Доля «1С» на российском рынке ERP может достичь 70%. URL: <https://cio.osp.ru/news/190422-Dolya-1S-na-rossiyskom-rynke-ERP-mozhet-dostich-70?ysclid=m6ykn7twf222830934>
7. Азаренкова И. В., Дианов Д. В. Экономический анализ дебиторской задолженности в предотвращении банкротства организации // Вестник экономической безопасности. 2022. № 1. С. 243-249. EDN AKBWWA.
8. Карданова Р. А., Бакаева З. Р. Анализ дебиторской и кредиторской задолженности: методология и практика // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2019. №4 (26). С. 115-117. EDN YQZYFD.
9. Левкина Е.В., Гузенко А.Г., Бухтиярова А.Ю. Оценка эффективности управления дебиторской и кредиторской задолженностью предприятия // Финансовый менеджмент. 2022. № 1. С. 13-23. EDN VGRKWQ.

10. Руденко А.Е., Калинин А.Р., Захаров Н.А. Современное состояние управления дебиторской задолженностью и ее анализ на промышленных предприятиях // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №7 (133). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.8>. EDN EDLASZ.

11. Сабирова Ю.Р. Коммуникация энергосбытовой компании с должниками: типология целевых групп // Век информации (сетевое издание). 2019. Т. 3, № 3 (8). С. 13-20. DOI: 10.33941/age-info.com33(8)16. EDN: MFXVTV.

12. Методика анализа дебиторской и кредиторской задолженности. URL: https://nalog-nalog.ru/analiz_hozyajstvennoj_deyatelnosti_ahd/metodika_analiza_debitorskoj_i_kreditorskoj_zadolzhennosti/#item-3.

13. Взыскание задолженности по агентской схеме. Эффективное управление проблемными активами. URL: <https://activebc.ru/wp-content/uploads/presentations/presentation-collection-2.pdf?ysclid=m6yl1dj1qdj0365667213>.

14. 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>

15. Солдатов Л.И. ABC - анализ как метод управления дебиторской задолженностью // Экономика и предпринимательство. 2020. № 7 (120). С. 911-917. <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.120.7.188>. EDN: OQWGGKF.

16. Еримизина М.И., Сергиенко О.В. Корреляционно-регрессионный анализ зависимости уровня рентабельности от эффективности управления дебиторской задолженностью организации // Развитие финансов, бухгалтерского учёта и аудита в современных концепциях управления: материалы I международной научно-практической конференции. Симферополь, 11–12 октября 2018 г., Симферополь, 2018. С. 145-147. EDN: YPIWAN.

17. Яковлев В.Б., Яковлева О.А. Инструменты продуктовой аналитики в аналитической платформе Loginom. М.: Эдитус, 2021. 124 с. EDN HKNBEY.

18. Яковлев В.Б. Машинное обучение на платформе Loginom. М.: Эдитус, 2023. 172 с. EDN YEAVZY.

19. Моделирование систем и процессов. Практический курс / В. Н. Волкова [и др.]; под ред. В. Н. Волковой. М.: Юрайт, 2024. 295 с. EDN: EFGHNI.

20. Protalinskiy O., Savchenko N., Khanova A. Data Mining Integration // Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. (eds). Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control in Systems, Decision and Control. 2020; (260): 39-49. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32648-7_4.

21. Прокопенко Н. Ю. Аналитические информационные системы поддержки принятия решений. Н. Новгород: ННГАСУ, 2020. 142 с.

References

1. Wholesale market of electric energy and capacity (In Russ.). Available at: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm>.
2. Trunova N. Energy efficiency of housing. *Bjulleten' Schetnoj palaty RF = Bulletin of the Accounts Chamber of the Russian Federation*. 2023; (8): 138. (In Russ.)
3. Along the curve - to balance. How the price of electricity is formed. (In Russ.). Available at: <https://sibgenco.online/news/element/on-a-curve-to-balance-what-is-the-price-of-electricity-/>.
4. Aluyan S.V., Katiti A.A. Energy sales industry of Russia: specifics and economic features. In: *Ekonomika, biznes, innovatsii: sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Economy, business, innovation. Collection of articles of the V International scientific and practical conference*. Penza; 2018. P. 153-158. (In Russ.). EDN SVQGHW.
5. Results of the wholesale electricity and capacity market from 11/19/2024 to 11/25/2024. (In Russ.). Available at: <https://www.np-sr.ru/ru/press/news/62932-itogi-raboty-optovogo-rynka-elektroenergii-i-moshchnosti-s-19112024-po-25112024>.
6. 1C's share of the Russian ERP market may reach 70%. (In Russ.). Available at: <https://cio.osp.ru/news/190422-Dolya-1S-na-rossiyskom-rynke-ERP-mozhet-dostich-70?ysclid=m6ykxn7twf222830934>.
7. Azarenkova I. V., Dianov D. V. Economic analysis of accounts receivable in preventing bankruptcy of an organization. *Vestnik ekonomicheskoi bezopasnosti = Bulletin of Economic Security*. 2022; (1): 243-249. (In Russ.). EDN AKBWWA.
8. Kardanova R. A., Bakaeva Z. R. Analysis of accounts receivable and payable: methodology and practice. *Izvestija Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V. M. Kokova = Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov*. 2019; (4): 115-117. (In Russ.). EDN YQZYFD
9. Levkina E.V., Guzenko A.G., Bukhtiyarova A.Yu. Evaluation of the effectiveness of management of accounts receivable and payable of the enterprise. *Finansovyj menedzhment = Financial management*. 2022; (1): 13-23. (In Russ.). EDN VGRKWQ.
10. Rudenko A.E., Kalinin A.R., Zakharov N.A. Current state of accounts receivable management and its analysis at industrial enterprises. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2023; (7): 1-6. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.8>. EDN EDLASZ.

11. Sabirova Yu.R. Communication of the energy sales company with debtors: typology of target groups. *Vek informacii = Information Age*. 2019; 3(3): 13-20. (In Russ.). [https://doi.org/10.33941/age-info.com33\(8\)16](https://doi.org/10.33941/age-info.com33(8)16). EDN: MFXVTV.

12. Methodology for analyzing accounts receivable and accounts payable (In Russ.). Available at: https://nalog-nalog.ru/analiz_hozyajstvennoj_deyatelnosti_ahd/metodika_analiza_debitorskoj_i_kreditorskoj_zadolzhennosti/#item-3.

13. Debt collection under the agency scheme. Effective management of problem assets (In Russ.). Available at: <https://activebc.ru/wp-content/uploads/presentations/presentation-collection-2.pdf?ysclid=m6y1djgdj0365667213>.

14. Mektepkaliyeva 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>

15. Soldatova L.I. ABC analysis as a method of accounts receivable management. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economy and Entrepreneurship*. 2020; (7): 911-917. (In Russ.). <https://doi.org/10.34925/EIP.2020.120.7.188>. EDN: OQWGKF.

16. Erimizina M.I., Sergienko O.V. Correlation and regression analysis of the dependence of the profitability level on the efficiency of the organization's accounts receivable management. In: *Razvitie finansov, buhgalterskogo uchjota i audita v sovremennykh koncepcijah upravlenija. Materialy I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Development of finance, accounting and audit in modern management concepts. Proceedings of the 1st international scientific and practical conference*. Simferopol; 2018. P. 145-147. (In Russ.). EDN: YPIWAH.

17. Yakovlev V.B., Yakovleva O.A. Product analytics tools in the Loginom analytical platform. Moscow: Editus; 2021. (In Russ.). EDN: HKNBEY.

18. Yakovlev V.B. Machine learning on the Loginom platform. Moscow: Editus; 2023. (In Russ.). EDN YEAVZY.

19. Volkova V. N., et al. Modeling of systems and processes. Practical course. Moscow: Yurait; 2024. (In Russ.). EDN: EFGHNI.

20. Protalinskiy O., Savchenko N., Khanova A. Data Mining Integration. In: *Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. (eds). Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control in Systems, Decision and Control*. 2020; (260): 39-49. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32648-7_4.

21. Prokopenko N. Yu. Analytical information systems for decision support. N. Novgorod: NNGASU; 2020. 142 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Серова Юлия Игоревна, магистрант,
Астраханский государственный технический
университет, г. Астрахань, Российская Федерация,
e-mail: yi_serova@mail.ru

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

Гурская Татьяна Геннадиевна, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
информационной безопасности, Астраханский
государственный университет им. В.Н.Татищева,
г. Астрахань, Российская Федерация,
e-mail: gurskai@mail.ru

Juliya I. Serova, Master's Student,
Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation,
e-mail: yi_serova@mail.ru

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

Tatyana G. Gurskaya, Cand of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Associate Professor of
the Information Security Department, Astrakhan
State University named after V.N. Tatishchev,
Astrakhan, Russian Federation,
e-mail: gurskai@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.072

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-96-106>

Модель поверхности атак для сложных систем на основе микросервисной архитектуры

В. Г. Миронова¹ ✉

¹ Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова
(Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»),
ул. Мясницкая, д. 20, г. Москва 101000, Российская Федерация

✉ e-mail: vgmironova@hse.ru

Резюме

Цель исследования: повышение уровня безопасности информации, обрабатываемой в информационных системах, основанных на микросервисной архитектуре; путём создания эффективной системы защиты, спроектированной на знаниях, полученных в результате создания модели поверхности атак.

Методы. В ходе проведения анализа были рассмотрены виды информационных систем (ИС), среди них выделены сложные ИС, созданные на основе микросервисной архитектуры. Рассмотрены российские и иностранные технологии, программное обеспечение, позволяющие автоматизировать процесс обработки информации. Предложена теоретико-множественная модель построения поверхности атаки для информационных систем, построенных на основе микросервисной архитектуры.

Результаты. Предложен оригинальный подход к описанию вектора и поверхности атаки, включающие в себя перечень часто встречающихся уязвимостей, способов и инструментов реализации атаки, а также перечень возможных объектов воздействия. Разработана теоретико-множественная модель построения поверхности атаки для информационных систем, построенных на основе микросервисной архитектуры.

Заключение. Проведение исследования и разработка модели поверхности атак для сложных ИС, построенных на микросервисной архитектуре, позволят повысить уровень знаний в области информационной безопасности (ИБ) и обеспечить безопасность обрабатываемых данных, путём построения эффективной системы защит информации, учитывающей актуальные угрозы и методы воздействия на ИС.

Ключевые слова: поверхность атаки; безопасность; тактика; техника; уязвимость.

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

Для цитирования: Миронова В. Г. Модель поверхности атак для сложных систем на основе микросервисной архитектуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 96-106. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-96-106>.

Поступила в редакцию 21.12.2024

Подписана в печать 07.02.2025

Опубликована 14.04.2025

Attack surface model for complex systems based on microservice architecture

Valentina G. Mironova¹ ✉

¹ Moscow Institute of Electronics and Mathematics named after A.N. Tikhonov
(National Research University Higher School of Economics),
20, Myasnitskaya str., Moscow 101000, Russian Federation

✉ e-mail: vgmironova@hse.ru

Abstract

Purpose of research. Increasing the level of security of information processed in information systems based on microservice architecture; by creating an effective protection system designed on the basis of knowledge obtained as a result of creating an attack surface model.

Methods. During the analysis, types of information systems (IS) were considered, among them complex IS created on the basis of microservice architecture were highlighted. Russian and foreign technologies, software allowing to automate the process of information processing were considered. A set-theoretic model of constructing an attack surface for information systems built on the basis of microservice architecture was proposed.

Results. An original approach to the description of the attack vector and surface is proposed, including a list of frequently encountered vulnerabilities, methods and tools for implementing an attack, as well as a list of possible objects of influence. A set-theoretic model for constructing an attack surface for information systems built on the basis of a microservice architecture is developed.

Results. Conducting research and developing an attack surface model for complex information systems built on a microservice architecture will improve the level of knowledge in the field of information security (IS) and ensure the security of processed data by building an effective information security system that takes into account current threats and methods of influencing the information system.

Keywords. attack surface; security; tactics; technique; vulnerability.

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

For citation: Mironova V. G. Attack surface model for complex systems based on microservice architecture // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 96-106 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-96-106>.

Received 21.12.2024

Accepted 07.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

В современном мире достаточно остро стоит вопрос обеспечения безопасности в активах организаций. Это связано прежде всего с тем, что технологии проникают во все сферы нашей деятельности.

Информационные системы (ИС) по структуре, наличию интеграции, функциональности можно разделить на простые и сложные. Простые ИС не могут обеспечивать достаточный уровень поддержки бизнес-процессов крупных и быстрорастущих компаний. Кроме того,

такие ИС плохо масштабируемы, сложны при интеграции. Простые ИС обычно разрабатываются для решения конкретных задач и имеют ограниченный функционал. Стоит отметить, что простые ИС зачастую представлены в виде монолитных решений, а, следовательно, для них характерно отсутствие гибкости. Монолитная архитектура представляет собой подход к разработке ИС, при котором приложение рассматривается как единое целое. Все компоненты системы, включая пользовательский интерфейс, бизнес-логику и работу с базой данных, тесно связаны и функционируют в рамках одного процесса.

Сложные ИС, в отличие от простых, обладают широким спектром функций, включая автоматизацию операций, анализ данных и поддержку принятия решений. Такие системы обычно включают в себя множество компонентов, таких как:

базы данных, сети, пользовательские интерфейсы и бизнес-приложения. Сложные ИС преимущественно построены на основе микросервисной архитектуры. Такие системы легко масштабируемы. С помощью сложных ИС возможно реализовать решения задач по автоматизации сложных бизнес-процессов в компаниях и в целом можно говорить про возможность обработки большого объема данных. Микросервисная архитектура позволяет сложным ИС быть гибкими при внесении в них изменений и проведении различных интеграций.

На рис. 1 схематично представлена монолитная и микросервисная архитектура ИС.

Обеспечение ИБ обязательно для всех видов систем. Она включает широкий спектр программно-технических, а также иных решений, направленных на защиту от киберугроз.

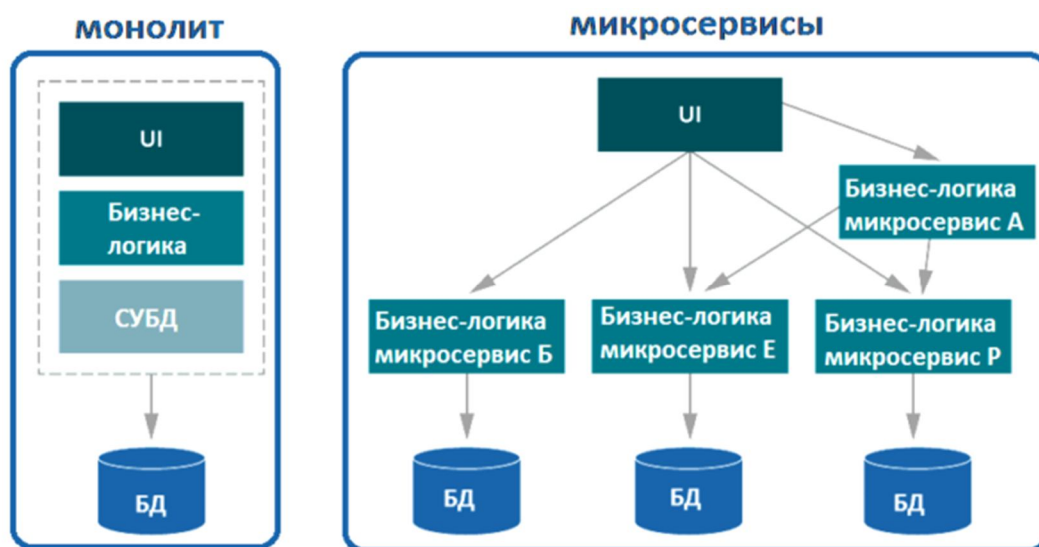


Рис. 1. Монолитная и микросервисная архитектура ИС

Fig. 1. Monolithic and micro-service architecture of IC

В [1] под киберугрозой принято считать потенциально возможное событие, действие, которое может нарушить бизнес-процесс или состояние защищенности информационного актива.

Под активом принято понимать сущность, имеющую ценность для компании, использующуюся для достижения целей компании, являющуюся объектом защиты и атаки с целью нарушения свойств безопасности (конфиденциальности, целостности и доступности).

Любое преднамеренное или непреднамеренное действие, которое нарушает, ограничивает или создаёт угрозу для нормального функционирования ИС, её конфиденциальности, целостности или доступности, можно отнести к атаке в контексте ИБ.

Преднамеренное действие, направленное на нарушение нормальной работы системы, её эксплуатацию или доступ к защищённой информации, можно отнести к атаке в контексте ИС.

В основном кибератаки – атаки, направленные на взлом компьютеров или серверов с использованием вредоносных программ, таких как вирусы, трояны и другие. Они могут привести к краже данных или получению контроля над устройством. Например, существуют программы-вымогатели, которые шифруют данные и требуют выкуп за их расшифровку. Также существуют атаки DoS и DDoS, которые перегружают систему запросами, делая её недоступной. DDoS-атаки сложнее обнаружить и защититься от них. АРТ-атаки представляют со-

бой сложные и долгосрочные атаки на конкретные компании или организации с целью шпионажа или саботажа.

Физические атаки – атаки, направленные на элементы IT-инфраструктуры, такие как серверы, сети и коммуникационные каналы. Они могут привести к краже оборудования или повреждению линий связи или устройств.

В [2-4] приведены основные этапы кибератаки, которые включают в себя: разведку, подготовку средств кибератаки, первоначальный доступ/инициацию доступа, исполнение, закрепление, повышение привилегий, сокрытие действий, доступ к учетным данным, исследование, боковое перемещение, сбор данных, управление и контроль, утечку данных и влияние.

Под поверхностью атаки принято понимать количество потенциально уязвимых объектов компьютерной системы [5]. В целом термин «Поверхность атаки» может применяться для оценки ресурсов, потраченных на обеспечение безопасности системы, сети или конкретного устройства.

Для одного и того же устройства или программы может существовать несколько векторов атаки. Также в одной атаке могут использоваться разные векторы.

В целом под вектором атаки понимается путь, способ или средство, с помощью которого киберпреступники проникают в целевую систему. К векторам атаки могут относиться как действия и инструменты злоумышленников, так и человеческий фактор или уязвимые техно-

логии на стороне потенциальной жертвы и ее подрядчиков [6].

В задачу специалистов по защите информации входит уменьшение количества точек, образующих поверхность атаки. Например, в случае отключения открытого, но не используемого порта поверхность атаки будет уменьшена.

Материалы и методы

Результатом систематизированного метода анализа и описания всех возможных точек входа и направлений атак является модель поверхности атаки.

Рассмотрим теоретико-множественную модель поверхности атаки, описываемую следующим кортежем параметров:

$$AS = \langle AV, V \rangle, \quad (1)$$

где AS (Attack Surface) – задает общие правила, согласно которым строится поверхность атаки; AV (Attack Vector) – множество векторов атак, V (vulnerability) – множество уязвимостей, присущих конкретно заданному объекту $V = \{v_1, v_2, \dots, v_j\}$, где $j \in N$.

В Федеральном законе РФ от 27.07.2006 №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» приведено понятие ИС. Под сложными ИС будем понимать системы:

- обладающие широким спектром функций, включая автоматизацию операций, анализ данных и поддержку принятия решений;
- включающие в себя множество компонент, таких как базы данных, се-

ти, пользовательские интерфейсы и бизнес-приложения;

- построенные на микросервисной архитектуре.

Безусловно, использование сложных ИС для автоматизации бизнес-процессов и задач является приоритетным, поскольку сложные ИС могут быть интегрированы с внешними и уже существующими внутренними ИС. Кроме того, они отличаются модульностью, поскольку могут состоять из нескольких взаимонезависимых элементов (сервисов), которые легко заменяются и добавляются без необходимости полной модернизации системы. Стоит отметить, что сложные ИС, построенные на микросервисной архитектуре, гораздо проще масштабировать относительно систем, которые построены на монолитной архитектуре.

В состав сложной ИС входит:

- аппаратное обеспечение (серверы, рабочие станции, сетевое оборудование и другие физические устройства, которые обеспечивают функционирование системы);
- микросервисы;
- сетевая инфраструктура (сети, которые обеспечивают передачу данных между различными компонентами системы);
- данные, которые обрабатываются с помощью микросервисов;
- пользовательские интерфейсы (графические интерфейсы, веб-интерфейсы и другие средства взаимодействия пользователей с ИС).

Существует множество инструментов, позволяющих сформировать перечень возможных сценариев реализации угроз информационной безопасности (ИБ) и описание векторов компьютерных атак для любой ИС.

В частности:

- MITRE ATT&CK

(<https://attack.mitre.org/>) – материал, созданный на основе реальных наблюдений, содержащий описание тактик, техник и процедур, которые могут использовать нарушители [7];

- CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) стандартизированный каталог идентификаторов известных уязвимостей [8];

- STRIDE. Модель помогает определять различные типы угроз, классифицируя их как подделку (Spoofing), подделку данных (Tampering), отказ от действий (Repudiation), раскрытие информации (Information Disclosure), отказ в обслуживании (Denial of Service) и повышение привилегий (Elevation of Privileges) [9].

- PASTA. Процесс моделирования атак и анализа угроз (PASTA) описывает семь шагов для сопоставления политики кибербезопасности с бизнес-целями: определение целей, определение сферы применения, разложение приложения, анализ угроз, анализ уязвимостей, моделирование атак, анализ риска и воздействия [10].

Отдельно стоит отметить Банк данных угроз безопасности информации, созданный Федеральной службой по техническому и экспортному контролю

(ФСТЭК России) и размещенный по адресу в сети Интернет: <https://bdu.fstec.ru/threat/>.

Маршрут или метод, который злоумышленник использует для реализации своих намерений – вектор атаки. Он определяет способ взаимодействия атакующего с объектом атаки с целью достижения поставленных задач.

Рассмотрим теоретико-множественную модель вектора атаки для сложной ИС следующим кортежем параметров:

$$AV = (F, S, O), \quad (2)$$

где AV (Attack Vector) – это совокупность множества векторов атак; F – множество уязвимых факторов; $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$, где $i \in N$; S – множество инструментов для реализации атаки, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, где $k \in N$; O – множество объектов для реализации атаки, $O = \{o_1, o_2, \dots, o_f\}$, где $f \in N$.

На практике анализ векторов атак и моделирование поверхности атак является необходимым, поскольку для любой ИС важно построить адекватную систему защиты информации. Рассмотрим веб-приложение, схема которого представлена на рис. 2. Веб-приложение включает в себя следующие сервисы:

- «Подсистема взаимодействия с пользователем» используется для обеспечения взаимодействия пользователя с остальными сервисами приложения;

- «Личный кабинет» необходим для сохранения персональных данных пользователя и взаимодействия с сервисами корзины, оплаты и доставки;

- «Сервис авторизации» отвечает за присвоение учетной записи положенных ей привилегий;

- «Корзина» используется для добавления пользователем необходимых товаров из каталога и перехода к сервису оплаты;

- «Товары» – каталог всех товаров интернет-магазина;

- «Оплата» используется для оплаты товаров, добавленных в корзину;

- «Доставка» помогает пользователю оформить доставку купленных товаров до места проживания.

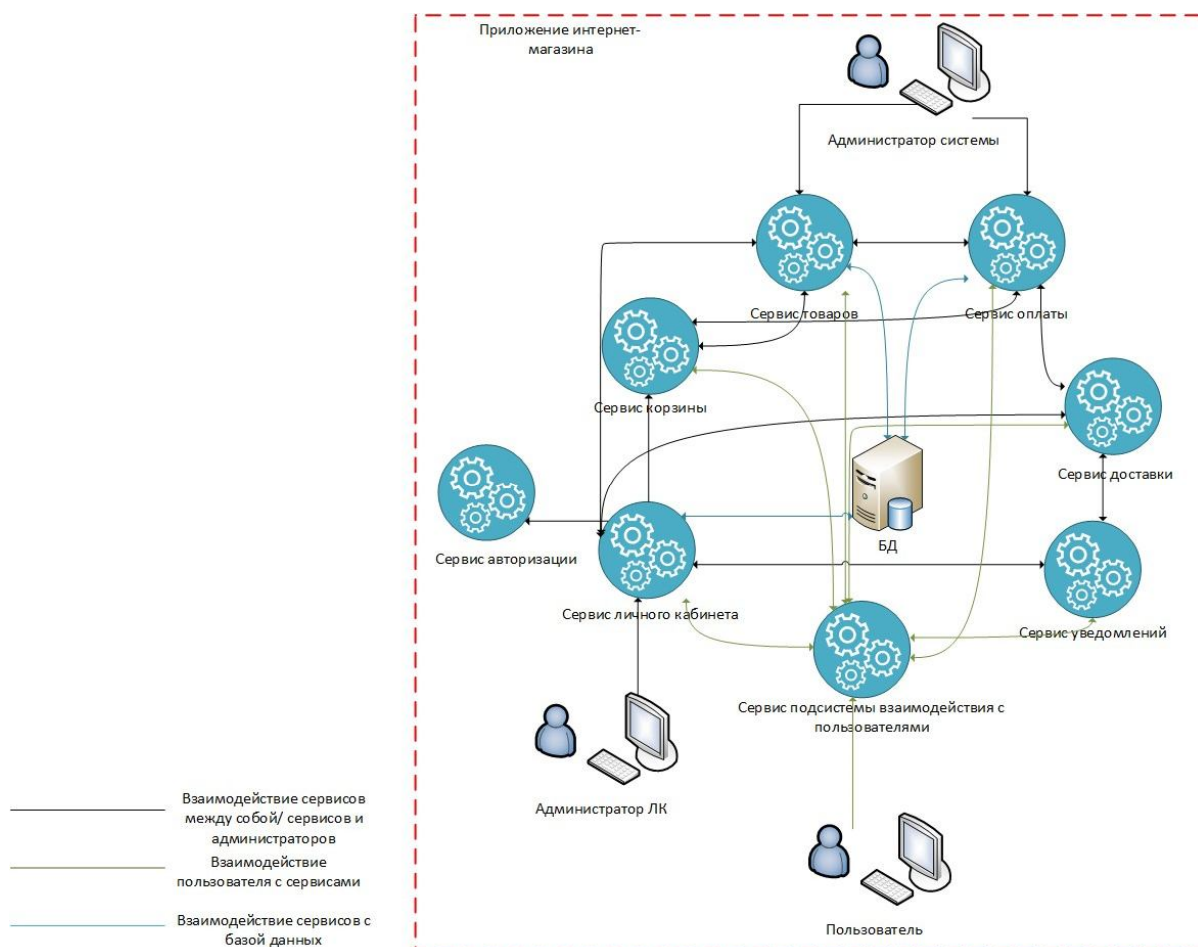


Рис. 2. Схема веб-приложения

Fig. 2. Web Application diagram

Для сервиса «Личный кабинет» в общем виде выделим объекты для реализации атаки:

- информация о пользователе (o_1);
- технические средства (o_2);
- структурные связи и программная среда (o_3);
- средства защиты информации (o_4).

В качестве инструментов реализации атаки в общем виде рассмотрим:

- вредоносное программное обеспечение (ПО) (s_1);
- программная закладка (s_2);
- сканирование трафика (s_3).

Под уязвимыми факторами будем понимать:

- отсутствие антивирусного ПО на компьютере пользователя (f_1);
- низкий уровень знаний в области ИБ персонала, обслуживающего систему (f_2);
- использование недоверенного ПО (f_3).

Вектор атаки для сервиса «Личный кабинет» вида $AVI = (o_1, s_1, f_1)$ говорит о том, что на информацию о пользователе, обрабатываемую в сервисе, возможна атака с использованием уязвимости вида «Отсутствие антивирусного ПО на компьютере пользователя» посредством использования вредоносной программы [11, 12, 13-18].

Результаты и их обсуждение

Знания, полученные в ходе построения модели поверхности атаки и анализа векторов атак, позволяют усилить

безопасность любой ИС путем устранения этих векторов и поддержания системы защиты информации в актуальном состоянии.

Выводы

Использование оригинального подхода к описанию вектора и поверхности атаки, который включает в себя возможность рассмотрения часто встречающихся уязвимостей, способов и инструментов реализации атаки, а также перечень возможных объектов воздействия, позволяет выявить возможные негативные факторы воздействия на ИС [19]. Определение векторов атак и построение моделей атак позволит спроектировать надёжную и эффективную систему защиты информации для сложных ИС.

Список литературы

1. Что такое Threat Intelligence и как применять? URL: http://www.sberbank.ru/ru/person/kibrary/articles/chto_takoe_threat_intelligence (дата обращения 10.11.2024).
2. Целевые атаки: этапы, инструменты, методы. URL: <http://www.sberbank.ru/ru/person/kibrary/articles/celevye-ataki-htapy-instrumenty-metody> (дата обращения 10.11.2024).
3. Этапы проведения кибератак методы. URL: <https://vasexperts.ru/blog/bezopasnost/etapy-provedeniya-kiberatak/> (дата обращения 10.11.2024).
4. Связанные одной цепью: Kill Chain – этапы кибератак и как их предотвратить – URL: <https://securitymedia.org/info/svyazannye-odnoy-tsepyu-kill-chain-etapy-kiberatak-i-kak-ikh-predotvratit.html> (дата обращения 10.11.2024).
5. Подходы к оценке поверхности атаки и фаззингу веб-браузеров. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-poverhnosti-ataki-i-fazzingu-veb-brauzerov> (дата обращения 10.11.2024).
6. Вектор атаки. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/attack-vector/> (дата обращения 10.11.2024).
7. MITRE ATT&CK. URL: <https://attack.mitre.org/> (дата обращения 10.11.2024).

8. CVE. URL: <https://cve.mitre.org/> (дата обращения 10.11.2024).
9. Адаптация подхода S.T.R.I.D.E. для моделирования угроз. URL: <https://osday.ru/2022/presentations/Moiseev.pdf> (дата обращения 10.11.2024).
10. PASTA Threat Modeling. URL: <https://threat-modeling.com/pasta-threat-modeling/> (дата обращения 10.11.2024).
11. Крупные кибератаки и утечки первой половины 2024 года в России. URL: <https://blog.cortel.cloud/2024/05/23/krupnye-kiberataki-i-utechki-pervoj-poloviny-2024-goda-v-rossii/> (дата обращения: 15.10.2024).
12. Разработка архитектуры киберполигона для повышения качества и результативности учебного процесса в исследовании атак на информационные системы и сети Г. А. Остапенко, С. С. Куликов, А. В. Коноплин, А. А. Остапенко // Информация и безопасность. 2023. Т. 26. № 1. С. 101-108. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.26.1.012>.
13. Демьянов А. Тестирование кибербезопасности встроенных систем с помощью их цифрового двойника // Электроника: наука, технология, безопасность. 2021. № 7 (208). С. 126–29.
14. Ульянов А.Н., Столяров М.Г., Стельмах И.В. Качество плюс наглядность применение технологий виртуализации вычислительных ресурсов в информационно-образовательной среде // ВВО. 2021. № 6 (33).
15. Монахов М.Ю., Тельный А.В., Мишин Д.В. О возможностях использования киберполигонов в качестве оценочных средств определения уровня сформированности компетенций // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2015. Т. 1, № 25. С. 269-277.
16. НКЦКИ: существует угроза кибератак на российские информационные ресурсы // Интернет-портал по информационной безопасности в сети. 2022. URL: <https://safesurf.ru/specialists/news/675925/> (дата обращения: 15.10.2024).
17. «Лаборатория Касперского»: количество киберинцидентов в российских компаниях увеличилось в 4 раза // «Лаборатория Касперского» : [сайт]. 2022. URL: https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/2022_laboratoriya-kasperskogokolichestvo-kiberincidentov-v-rossijskih-kompaniyah-uvelichilos-v-4-raza (дата обращения: 15.10.2024).
18. Монахов М.Ю., Тельный А.В., Мишин Д.В. О возможностях использования киберполигонов в качестве оценочных средств определения уровня сформированности компетенций // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2015. Т. 1, № 25. С. 269-277.
19. Архангельский О.Д., Сютлов Д.В., Кузнецов А.В. Практические подходы к созданию инфраструктуры индустриального киберполигона // Автоматизация в промышленности. 2020. № 1. С. 52–57.

References

1. What is Threat Intelligence and how to use it? (In Russ.). Available at: http://www.sberbank.ru/ru/person/kibrary/articles/chto_takoe_threat_intelligence (accessed 10.11.2024).
2. Targeted attacks: stages, tools, methods. (In Russ.). Available at: <http://www.sberbank.ru/ru/person/kibrary/articles/celevye-ataki-ehrapy-instrumenty-metody> (accessed 10.11.2024).
3. Stages of cyber attacks methods. (In Russ.). Available at: <https://vasexperts.ru/blog/bezopasnost/etapy-provedeniya-kiberatak/> (accessed 10.11.2024).
4. Linked by one chain: Kill Chain - stages of cyber attacks and how to prevent them. (In Russ.). Available at: <https://securitymedia.org/info/svyazannye-odnoy-tsepyu-kill-chain-etapy-kiberatak-i-kak-ikh-predotvratit.html> (accessed 10.11.2024).
5. Approaches to assessing the attack surface and fuzzing web browsers. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-poverhnosti-ataki-i-fazzingu-veb-brauzerov> (accessed 10.11.2024).
6. Attack vector. (In Russ.). Available at: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/attack-vector/> (accessed 10.11.2024).
7. MITRE ATT&CK. Available at: <https://attack.mitre.org/> (accessed 10.11.2024).
8. CVE. Available at: <https://cve.mitre.org/> (accessed 10.11.2024).
9. Adaptation of the S.T.R.I.D.E. approach for threat modeling. (In Russ.). Available at: <https://osday.ru/2022/presentations/Moiseev.pdf> (accessed 11/10/2024).
10. PASTA Threat Modeling. Available at: <https://threat-modeling.com/pasta-threat-modeling/> (accessed 10.11.2024).
11. Major cyberattacks and leaks in the first half of 2024 in Russia. (In Russ.). Available at: <https://blog.cortel.cloud/2024/05/23/krupnye-kiberataki-i-utechki-pervoj-poloviny-2024-goda-v-rossii/> (accessed 15.10.2024).
12. Ostapenko G. A., Kulikov S. S., Konoplin A. V., Ostapenko A. A. Development of cyber polygon architecture to improve the quality and effectiveness of the educational process in the study of attacks on information systems and networks. *Informatsiya i bezopasnost' = Information and security*. 2023; 26(1): 101-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.26.1.012>.
13. Demyanov A. Testing the cybersecurity of embedded systems using their digital counterpart. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, bezopasnost' = Electronics: science, technology, safety*. 2021; (7): 126-29. (In Russ.).
14. Ulyanov A.N., Stolyarov M.G., Stelmakh I.V. Quality plus visibility the use of virtualization technologies for computing resources in the information and educational environment. *BBO*. 2021; (6). (In Russ.).
15. Monakhov M.Yu., Telny A.V., Mishin D.V. On the possibilities of using cyber polygons as assessment tools for determining the level of competence formation. *Informatsionnoe protivodeistvie ugrozam terrorizma = Information counteraction to terrorist threats*. 2015; 1(25): 269-277 (In Russ.).

16. NCC: There is a threat of cyber attacks on Russian information resources. *An online information security portal on the web*. 2022 (In Russ). Available at: <https://safesurf.ru/specialists/news/675925/> (accessed: 10/15/2024).

17. Kaspersky Lab: the number of cyber incidents in Russian companies has increased 4 times. *Kaspersky Lab: [website]*. 2022. (In Russ). Available at: https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/2022_laboratoriya-kasperskogokolichestvo-kiberincidentov-v-rossijskih-kompaniyah-uvelichilos-v-4-raza (accessed: 10/15/2024).

18. Monakhov M.Yu., Telny A.V., Mishin D.V. On the possibilities of using cyber ranges as assessment tools for determining the level of competence development. *Informatsionnoe protivodeistvie ugrozam terrorizma = Information counteraction to terrorist threats*. 2015; 1(25): 269-277 (In Russ).

19. Arkhangelsky O.D., Syutov D.V., Kuznetsov A.V. Practical approaches to creating the infrastructure of an industrial cyberpolygon. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry*. 2020; (1): 52-57. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Миронова Валентина Григорьевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
информационной безопасности
киберфизических систем, Московский
институт электроники и математики
им. А.Н. Тихонова (Национальный исследова-
тельский университет «Высшая школа
экономики»), г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: vgmironova@hse.ru

Valentina G. Mironova, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor
of Information Security of Cyber-Physical
Systems Department, Moscow Institute of
Electronics and Mathematics named
after A.N. Tikhonov (National Research
University Higher School of Economics),
Moscow, Russian Federation,
e-mail: vgmironova@hse.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.932

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-107-122>

Подход для измерения геометрических параметров объектов с использованием цифровых камер

К. Д. Коновалов ¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: kodmko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является разработка обобщенного метода оценки геометрических параметров объекта по фотоснимкам в условиях отсутствия информации об априорных параметрах объекта, а также с возможностью использования для производства снимков цифровых камер с различными оптическими системами.

Методы. Для реализации поставленной цели была разработана математическая модель оптической системы, состоящей из двух цифровых камер. Затем, путем приведения данной математической модели к единой системе уравнений, был разработан метод вычисления координат объекта на снимке, а также расстояния до него. Затем была проведена экспериментальная проверка полученного метода.

Результаты. Результатом работы является разработанный обобщенный метод оценки геометрических параметров объекта в условиях отсутствия информации об априорных параметрах объекта с использованием двух снимков с цифровых камер с различными оптическими системами. Выполнена экспериментальная проверка точности работы разработанного метода при вычислении расстояния до объекта с использованием типовых камер с различными объективами, показавшая, что данный метод позволяет оценивать геометрические параметры объектов с точностью 90% и выше в зависимости от точности измерения технических параметров камер. Также была произведена оценка чувствительности разработанного метода к значениям технических параметров используемых цифровых камер.

Заключение. Произведенные экспериментальные проверки показали, что разработанный метод позволяет с высокой точностью оценивать расстояние до объектов с использованием снимков с двух цифровых камер, однако требует высокой точности измерения технических параметров используемых камер. В качестве дальнейших путей развития данного метода можно отметить возможность повышения точности измерений путем добавления в разработанную математическую модель нелинейных искажений (дисторсии).

Ключевые слова: определение расстояний; экспертиза цифровых изображений; модель камера-обскуры; математическое моделирование; стереозрение.

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

Для цитирования: Коновалов К. Д. Подход для измерения геометрических параметров объектов с использованием цифровых камер // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 107-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-107-122>.

Поступила в редакцию 10.12.2024

Подписана в печать 28.01.2024

Опубликована 14.04.2025

Approach for measuring geometric parameters of objects using digital cameras

Konstantin D. Konovalov ¹ ✉

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

✉ e-mail: kodmko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of the research is to develop a generalized method for estimating the geometric parameters of an object from photographs in the absence of information about the a priori parameters of the object, as well as with the possibility of using digital cameras with various optical systems to produce images.

Methods. To achieve this goal, a mathematical model of an optical system consisting of two digital cameras was developed. Then, by reducing this mathematical model to a single system of equations, a method was developed for calculating the coordinates of an object in an image, as well as the distance to it. Then the experimental verification of the obtained method was carried out.

Results. The result of the work is a generalized method for estimating the geometric parameters of an object in the absence of information about the a priori parameters of the object using two images from digital cameras with different optical systems. An experimental verification of the accuracy of the developed method was performed when calculating the distance to an object using standard cameras with different lenses, which showed that this method allows estimating the geometric parameters of objects with an accuracy of 90% or higher, depending on the accuracy of measuring the technical parameters of the cameras. The sensitivity of the developed method to the values of the technical parameters of the digital cameras used was also evaluated.

Conclusion. Experimental tests have shown that the developed method allows us to accurately estimate the distance to objects using images from two digital cameras, however, it requires high accuracy in measuring the technical parameters of the cameras used. As further ways of developing this method, it is possible to note the possibility of increasing the accuracy of measurements by adding nonlinear distortions (distortions) to the developed mathematical model.

Keywords: calculation of distances; expertise of digital images; pinhole camera model; mathematical modeling; stereo vision.

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

For citation: Konovalov K. D. Approach for measuring geometric parameters of objects using digital cameras // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 107-122 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-107-122>.

Received 10.12.2024

Accepted 28.01.2025

Published 14.04.2025

Введение

Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются одним из наиболее активно развивающихся типов

робототехнических систем. Одной из основных составляющих их систем управления являются системы навигации, позволяющие БПЛА определять собствен-

ное местоположение, а также выполнять полетное задание. Одним из наиболее перспективных типов систем навигации БПЛА являются системы видеонавигации. Данные системы в качестве источника данных используют фото- или видеоданные с бортовых камер (в случае использования одновременно нескольких камер используется понятие «стереозрение» [1]), а также, в ряде случаев, информацию о местности, в которой производится полет [2].

Сегодня существуют различные подходы к созданию систем видеонавигации БПЛА. Однако в их рамках решается ряд типовых задач. Одной из таких задач является необходимость измерения расстояния до объектов, а также их геометрических параметров с использованием снимков с бортовых камер. Например, подобная задача может решаться для определения высоты полета БПЛА, как описано в [3, 4]. В общем виде она может быть описана следующим образом: в качестве входных данных используются два снимка с разных бортовых камер БПЛА, на которых запечатлен некоторый объект на поверхности земли. Необходимо, используя данные два снимка, определить расстояние от БПЛА до объекта. Также известны технические параметры обеих бортовых камер, при этом сами бортовые камеры могут отличаться друг от друга по данным характеристикам.

При этом разработка методов измерения расстояния от камеры до объектов, а также их линейных размеров, с

использованием только изображения с камеры, является актуальной и в ряде других задач, связанных с технологиями дополненной реальности и системами компьютерного зрения. Эффективный алгоритм её решения может помочь в решении более сложных задач, например, в повышении качества создаваемых 3D-моделей в методах фотограмметрии, а также в разработке и оптимизации SLAM-методов.

Материалы и методы

На сегодняшний день разработаны решения, позволяющие с высокой точностью оценивать расстояния до объектов по цифровым фотографиям в тех случаях, когда известны некоторые априорные параметры объекта, расстояние до которого необходимо вычислить. Так, в работе [5] автор указывает, что точность определения расстояния в таком случае составляет 1,2 – 2,4 %. Однако в некоторых случаях необходимо производить такую операцию для объектов с заранее неизвестными параметрами. В таких случаях известные подходы не применимы, поскольку при попытке перевести координаты из 3-мерных (объекты в физическом пространстве) в 2-мерные (изображение объектов на фотографии) решение будет получено в виде луча, на котором располагается искомая точка, без возможности вычислить конкретные ее координаты.

В таких случаях можно вычислить координаты, если известны априорные геометрические параметры объекта (на-

пример, если необходимо вычислить расстояние до жилого здания можно считать высоту этажа приближенно равной 3 метрам), однако такой подход возможен далеко не всегда, а если возможен, может внести существенные погрешности в итоговый результат в случае неверной оценки параметров объекта. В качестве варианта решения данной задачи может быть использован метод, позволяющий вычислять расстояние с использованием изображений, полученных с камеры, имеющей заметные нелинейные искажения (дисторсию). Подобное использование известных особенностей самой камеры как измерительного устройства ранее рассматривались, например в [6, 7].

Другим подходом к решению задачи измерения геометрических параметров объектов с использованием изображений является использование комбинированной измерительной системы, включающей в себя камеру и дополнительное измеряющее устройство, например, лазер. Примеры подобных систем описаны в [8, 9]. Подобные системы позволяют добиться высокой точности измерений. Так, в [9] отмечается, что погрешность вычисления расстояния составила ± 3 см при измеряемой дистанции до 1,5 метров. Однако в случае с БПЛА применение подобных систем не всегда возможно, поскольку может потребоваться установка на БПЛА дополнительных аппаратных средств (лазеров), которые могут не быть предусмотрены конструктивно.

Также, в соответствии с современными тенденциями, ведутся активные

разработки в области создания системы измерения геометрических параметров на основе фото- или видеоданных с использованием систем искусственного интеллекта. Примеры подобных систем можно найти в работах [10-12]. Системы подобного типа являются достаточно перспективными и, вероятно, с течением времени и улучшением качества работы систем искусственного интеллекта будут применяться все в больших объемах. Однако на сегодняшний день точность работы подобных систем недостаточно высока. Так, в [10] авторы отмечают, что при использовании для измерения расстояния до предметов, находящихся на большом удалении (более нескольких метров), погрешность измерения сильно возрастает и может составлять более 20%. Подобная погрешность превышает допустимые значения для поставленной задачи.

Вариант измерения линейных размеров объектов с помощью камер с различными оптическими системами является предметом рассмотрения в данной статье. В отличие от известных методов определения расстояний до объекта с использованием стереозрения с парой идентичных камер [13-15], в данной работе рассматривается обобщенный случай с использованием системы камер с различными оптическими системами с последующим переходом на использование одной карты с известными калиброванными характеристиками оптической системы.

В данной работе для удобства будет рассматриваться математическая модель камеры, соответствующая камере «камера-обскура». Она описывает фотокамеру с двумя допущениями: во-первых, диафрагма представляется в виде точки, а не отверстия некоторого диаметра. За счёт этого можно считать, что каждый пиксель в изображении освещается единственным лучом, а не световым пучком. Во-вторых, в модели «камера-обскура» игнорируется система линз, используемая для фокусировки света [16]. За счёт этого можно игнорировать вносимые ими искажения, например, дисторсию.

Рассмотрим вначале систему, состоящую из одной камеры. В ней присутствуют две системы координат – первая (назовем её $O_1X_1Y_1Z_1$) является трёхмерной системой координат, в которой в дальнейшем мы будем определять координаты объекта. Будем считать начало системы координат привязанным к точке, являющейся диафрагмой камеры. При этом ось O_1Z_1 направлена в направлении обзора камеры и называется оптической осью, главной осью или главным лучом [16]. Вторая система координат (назовем её $r_1x_1y_1$) является локальной двумерной системой координат плоскости изображения. Ее центр и ориентацию также в общем случае можно выбрать произвольными, но для уменьшения требуемых операций преобразования координат можно принять следующие правила: во-первых, центр данной системы координат r_1 рас-

положен в точке пересечения оптической оси с плоскостью изображения. В этом случае r_1 будет являться главной точкой изображения, то есть его центром. Во-вторых, оси r_1x_1 и r_1y_1 сонаправлены с осями O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно. В этом случае расстояние между точками r_1 и O_1 будет известно и равно фокусному расстоянию f_1 используемой камеры.

В рамках данной системы рассмотрим две точки. Первую обозначим как P с координатами в трехмерной системе (X_1, Y_1, Z_1) . Это та точка, расстояние до которой необходимо вычислить в процессе решения. Вторую точку обозначим как Q_1 с координатами в двумерной системе (x_1, y_1) . Эта точка является проекцией точки P на плоскость изображения. Соответственно, точки P и Q_1 находятся на одной линии, проходящей через диафрагму камеры. Схематично изображение рассматриваемой системы с изображением данных точек приведено на рис. 1.

Для рассматриваемой системы известны соотношения, описывающие связь координат точек P и Q_1 [16]:

$$\begin{cases} \frac{-x_1}{f_1} = \frac{X_1}{Z_1} \\ \frac{-y_1}{f_1} = \frac{Y_1}{Z_1} \end{cases} \quad (1)$$

или

$$\begin{cases} x_1 = -\frac{f_1 \cdot X_1}{Z_1} \\ y_1 = -\frac{f_1 \cdot Y_1}{Z_1} \end{cases} \quad (2)$$

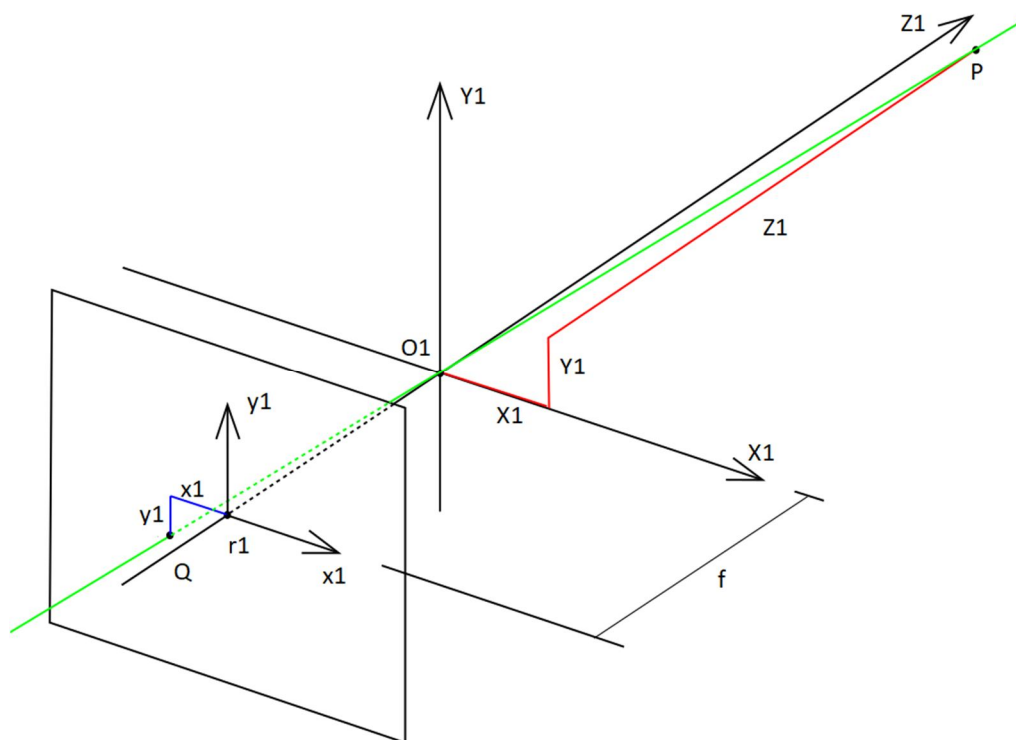


Рис. 1. Геометрическая система рассматриваемой модели камеры

Fig. 1. Geometric system of the camera model in question

Как уже упоминалось выше, для вычисления расстояния до объекта будут использоваться два изображения с двух разных камер. Модель второй камеры опишем с помощью аналогичной геометрической модели, где индексы переменных заменим с 1 на 2. Точка P остается неизменной, однако в новой трехмерной системе координат она будет иметь новые координаты (X_2 , Y_2 , Z_2). Также она будет иметь проекцию на плоскость изображения второй камеры Q_2 с координатами в двухмерной системе (x_2 , y_2). Тогда, аналогично формулам (1) и (2) получаем:

$$\begin{cases} \frac{-x_2}{f_2} = \frac{X_2}{Z_2} \\ \frac{-y_2}{f_2} = \frac{Y_2}{Z_2} \end{cases} \quad (3)$$

или

$$\begin{cases} x_2 = -\frac{f_2 \cdot X_2}{Z_2} \\ y_2 = -\frac{f_2 \cdot Y_2}{Z_2} \end{cases} \quad (4)$$

Также для вычисления расстояния до объекта необходимо знать величину сдвига камер относительно друг друга (величину базы). Далее будем выражать его в виде сдвига трёхмерных систем координат, привязанных к камерам, и обозначим вектором смещений (dX , dY , dZ). Для упрощения будем считать, что плоскости изображений обеих камер параллельны и их системы координат ориентированы одинаково. В противном случае при переходе из одной системы координат в другую необходимо дополнительно пересчитывать углы по-

ворота. В данном же случае можно получить более простой вариант преобразования координат:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + dX \\ Y_2 = Y_1 + dY \\ Z_2 = Z_1 + dZ. \end{cases} \quad (5)$$

Далее подставим (5) в (3) и объединим результат в единую систему уравнений с (1). Данное действие возможно, поскольку обе системы описывают одну и ту же точку Р. Получаем:

$$\begin{cases} \frac{-x_1}{f_1} = \frac{X_1}{Z_1} \\ \frac{-y_1}{f_1} = \frac{Y_1}{Z_1} \\ \frac{-x_2}{f_2} = \frac{X_1 + dX}{Z_1 + dZ} \\ \frac{-y_2}{f_2} = \frac{Y_1 + dY}{Z_1 + dZ}. \end{cases} \quad (6)$$

В левых частях уравнений не содержится неизвестных, поэтому их значения могут быть вычислены, переобозначив их как a_1 , b_1 , a_2 и b_2 , соответственно получим:

$$\begin{cases} a_1 \cdot Z_1 = X_1 \\ b_1 \cdot Z_1 = Y_1 \\ a_2 \cdot Z_1 + a_2 \cdot dZ = X_1 + dX \\ b_2 \cdot Z_1 + b_2 \cdot dZ = Y_1 + dY. \end{cases} \quad (7)$$

Решением полученной системы из 4 линейных уравнений будет следующее:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 \\ 0 & -1 & b_1 \\ -1 & 0 & a_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ dX - a_2 \cdot dZ \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Delta &= a_2 - a_1, \\ \Delta_1 &= a_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ), \\ \Delta_2 &= b_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ), \\ \Delta_3 &= dX - a_2 \cdot dZ. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда окончательное решение:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{a_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ)}{a_2 - a_1}, \\ Y_1 &= \frac{b_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ)}{a_2 - a_1}, \\ Z_1 &= \frac{dX - a_2 \cdot dZ}{a_2 - a_1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отметим, что система может оказаться несовместной и не иметь решения в случае, если значения a_1 и a_2 будут равны. В общем случае, если такое произошло, можно вычислить новое решение, используя первое, второе и четвертое уравнения из системы 7. В этом случае значение главного определителя системы будет равно $b_2 - b_1$. При использовании двух других комбинаций уравнений из системы (7) главный определитель также будет равен одному из двух вышеупомянутых выражений. Это означает, что данный алгоритм не будет корректно работать в случае использования двух фотографий объекта с одной и той же камеры без её перемещения. Также в таком случае попытка использовать трансфокактор не будет успешной, поскольку, перемещая проекцию рассматриваемой точки ближе к краям изображения и увеличивая тем самым абсолютные значения ее координат, аналогично будет увеличиваться и фокусное расстояние камеры, поэтому конечное значение их соотношения останется неизменным.

Для проверки данных ограничений воспользуемся методом Гаусса. Запишем расширенную матрицу системы (7) и, с помощью допустимых в методе Гаусса преобразований, приведем ее к треугольному виду:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ -1 & 0 & a_2 & dX - a_2 \cdot dZ \\ 0 & -1 & b_2 & dY - b_2 \cdot dZ \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 - a_1 & dX - a_2 \cdot dZ \\ 0 & -1 & b_2 & dY - b_2 \cdot dZ \end{bmatrix} = \\
\begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 - a_1 & dX - a_2 \cdot dZ \\ 0 & 0 & b_2 - b_1 & dY - b_2 \cdot dZ \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{dX - a_2 \cdot dZ}{a_2 - a_1} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{dY - b_2 \cdot dZ}{b_2 - b_1} \end{bmatrix} \quad (10)
\end{aligned}$$

Как видно из полученной в (10) матрицы, ранее сделанный вывод является верным. Кроме того, исходя из структуры данной матрицы можно сделать еще один вывод – поскольку в данной матрице две строки, в которых содержится только Z_1 , значение данной переменной может быть вычислено двумя способами. В общем случае может быть использован любой из них. Однако если выполняется одно из двух условий: $dY = dZ = 0$; $dX = dZ = 0$ в результате использования одного из методов решение вырождается в нулевое: $X_1 = Y_1 = Z_1 = 0$. Соответственно, при возникновении одного из таких случаев необходимо использовать второй способ, который не приводит к вырождению решения. Также это подтверждает, что данный метод не будет работать при съемке с одной и той же точки. В этом случае к вырождению в нулевое решение приведут оба способа вычисления Z_1 .

После получения значений координат объекта нетрудно вычислить расстояние до него от первой камеры с помощью формулы

$$d = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}. \quad (11)$$

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная проверка полученных выражений проводилась с использованием цифровых камер с объективами Helios-44M, Industar-50-2 и Sony Zeiss Vario-Sonnar T. В качестве объекта использовались стандартные калибровочные сетки. Общая схема эксперимента приведена на рис. 2.

Фотосъемка осуществлялась с двух фиксированных точек, обозначенных как А и В. В качестве системы с индексом 1 использовалась система, описывающая камеру, находившуюся в точке А. Таким образом, искомое расстояние до изображения калибровочной сетки Р составляет 640 мм, или 0,64 м. Данные о каждом снимке приведены в табл. 1. Результаты работы алгоритма приведены в табл. 2.

По результатам проведения эксперимента можно сделать ряд выводов. Во-первых, существуют явно прослеживаемые закономерности полученных результатов.

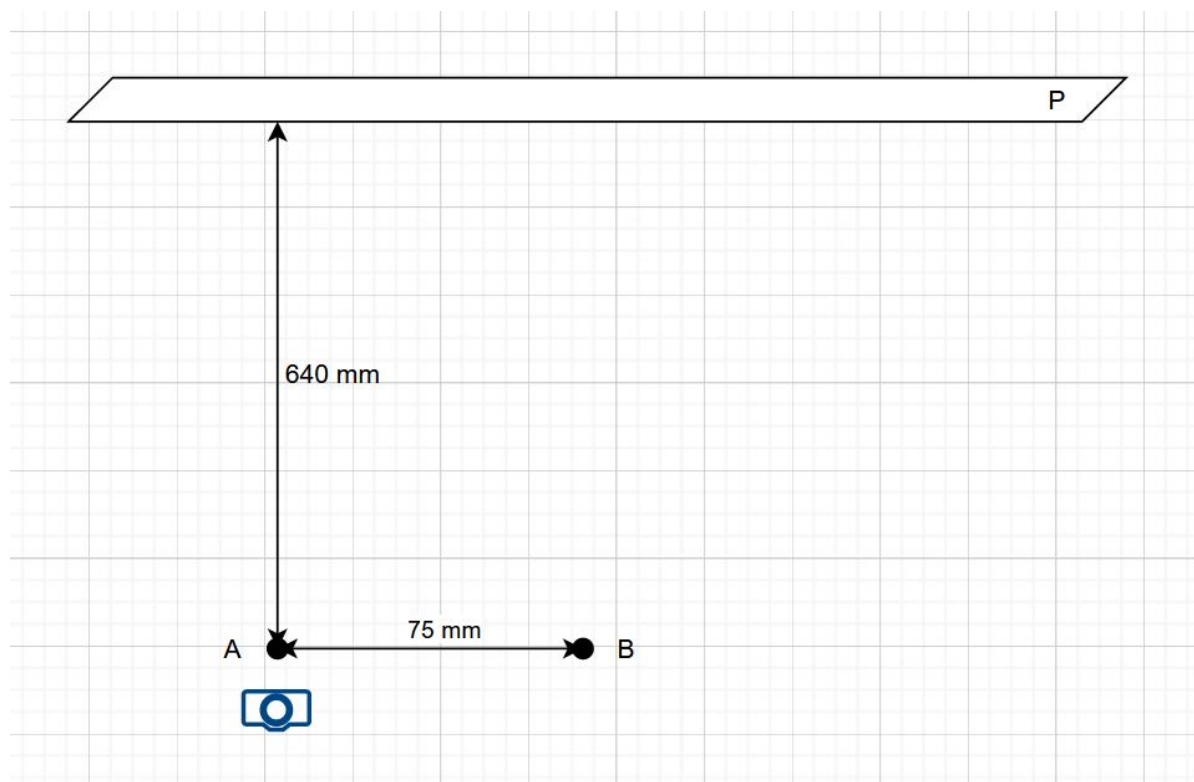


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Fig. 2. The scheme of the experiment

Таблица 1. Исходные данные для проведения эксперимента

Table 1. The initial data for the experiment

Камера / Camera	Точка / Point	f, мм / f, mm	Координаты выбранной точки на снимке / Coordinates of the selected point on the image	
			x	y
Helios	A	58	3100	2320
Helios	B	58	1651	2320
Industar	A	50	3041	2314
Industar	B	50	1833	2314
Sony Zeiss	A	28	3143	2143
Sony Zeiss	B	28	2427	2143
Sony Zeiss	A	35	3164	2186
Sony Zeiss	B	35	2325	2186
Sony Zeiss	A	85	3122	2443
Sony Zeiss	B	85	1320	2443

Таблица 2. Результаты проведения эксперимента**Table 2.** The results of the experiment

Точка А, камера / Point A, camera	Точка В, камера / Point B, camera	Вычисленное расстояние, м / Calculated distance, m
Helios	Helios	0,5081
Helios	Industar	0,5064
Helios	Sony, 28	0,572
Helios	Sony, 35	0,6041
Helios	Sony, 85	0,5907
Industar	Helios	0,5272
Industar	Industar	0,5254
Industar	Sony, 28	0,5964
Industar	Sony, 35	0,6314
Industar	Sony, 85	0,6167
Sony, 28	Helios	0,4476
Sony, 28	Industar	0,4463
Sony, 28	Sony, 28	0,4965
Sony, 28	Sony, 35	0,5205
Sony, 28	Sony, 85	0,5105
Sony, 35	Helios	0,4543
Sony, 35	Industar	0,453
Sony, 35	Sony, 28	0,5048
Sony, 35	Sony, 35	0,5296
Sony, 35	Sony, 85	0,5193
Sony, 85	Helios	0,514
Sony, 85	Industar	0,5123
Sony, 85	Sony, 28	0,5795
Sony, 85	Sony, 35	0,6125
Sony, 85	Sony, 85	0,5987

Так, при использовании снимков из точки В с объективов Helios и Industar результаты были значительно хуже, чем при использовании объектива Sony. Данный результат можно объяснить погрешностью измерения смещения камеры при съемке из точки В с этих объективов (подробнее зависимость результатов от точ-

ности измерения исходных параметров будет описана ниже). Аналогичная ситуация наблюдается при использовании объектива Sony с фокусным расстоянием 28 и 35 мм в точке А. Если удалить из результирующей выборки результаты с высокой погрешностью, описанные выше, получаем 9 результатов в диапазоне

от 0,572 м до 0,6314. Таким образом, погрешность вычислений находится в диапазоне от 10% до 1,5%. Во-вторых, все полученные значения строго меньше истинного расстояния (0,64 м), что обусловлено допущениями, используемыми в модели «камера-обскуры» и вносимыми ими погрешностями.

Следующим шагом, который необходимо сделать, является оценка чувствительности данного метода к точности измерений. Большинство из параметров, используемых при вычислениях, либо измеряются с высокой точностью, либо берутся из технической документации. Исключением из этого является смещение, которое в большинстве случаев измеряется вручную. Со-

ответственно, необходимо оценить зависимость точности вычислений от точности измерений трех параметров: dX , dY , dZ . Поскольку наглядно изобразить зависимость одной переменной от трех других довольно сложно, были исследованы три зависимости от двух переменных – dX и dY , dX и dZ , dY и dZ . В каждом случае фиксировалось значение одной из трех переменных, а две другие изменялись с шагом 1 мм. После этого на основе вычисленных значений строился 3D-график соответствующей зависимости. В качестве исходных данных использовался эксперимент Industar-Sony 35, как показавший наиболее точный результат. Полученные в ходе работы графики приведены на рис. 3-5.

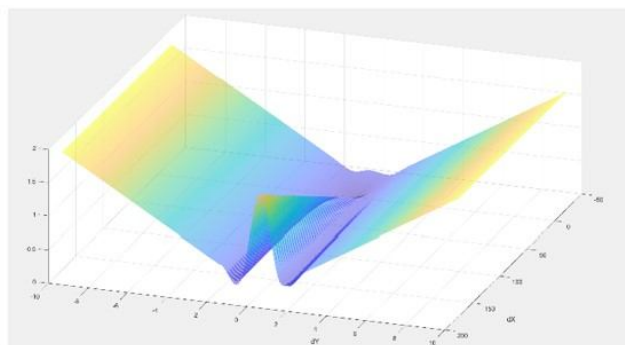
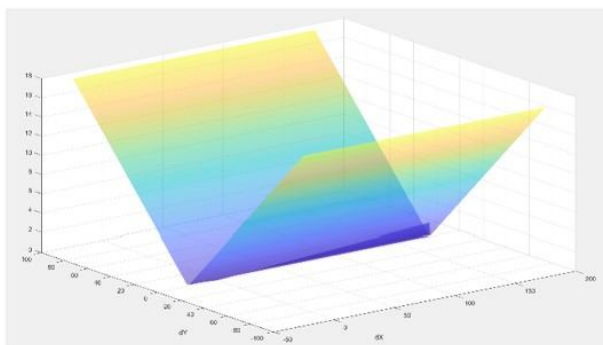


Рис. 3. График зависимости результатов работы метода в зависимости от значения величин dX и dY

Fig. 3. Graph of the dependence of the results of the method depending on the values of dX and dY

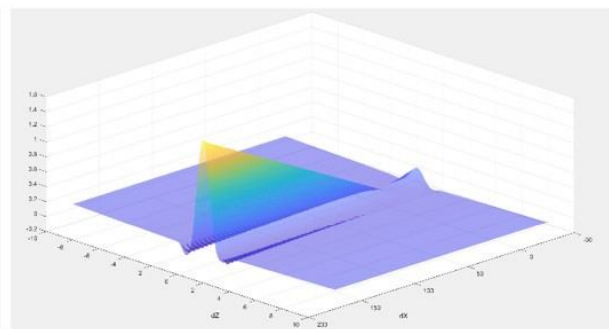
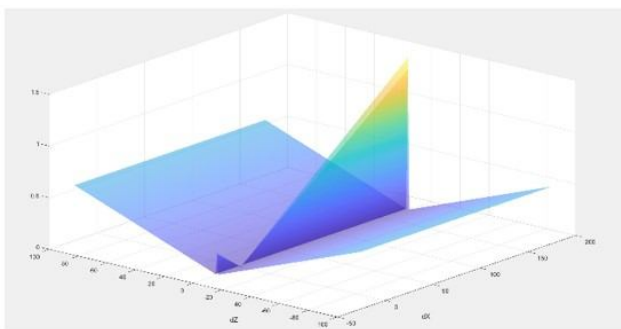


Рис. 4. График зависимости результатов работы метода в зависимости от значения величин dX и dZ

Fig. 4. Graph of the dependence of the results of the method depending on the values of dX and dZ

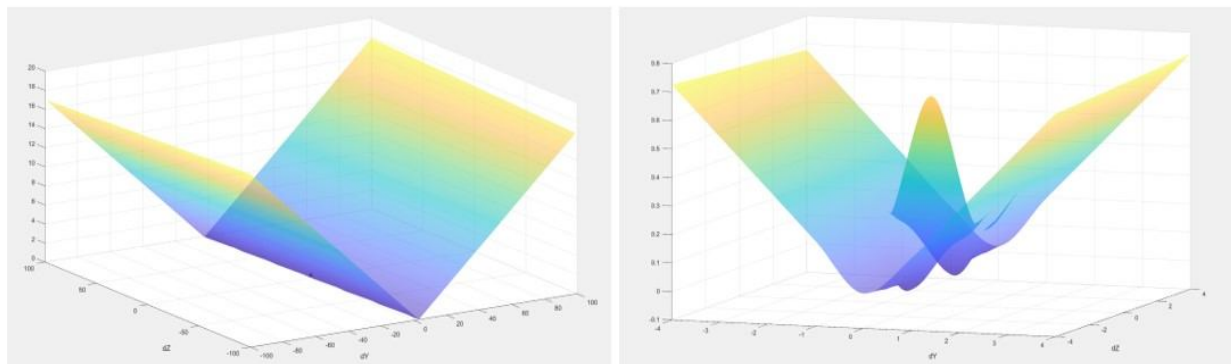


Рис. 5. График зависимости результатов работы метода в зависимости от значения величин dY и dZ

Fig. 5. Graph of the dependence of the results of the method depending on the values of dY and dZ

Как видно, во всех экспериментах наблюдается одинаковая тенденция – результат работы алгоритма изменяется линейно, однако в районе 0 наблюдается «выброс» данных с существенным отклонением результата. Таким образом, для повышения точности работы данного метода рекомендуется использовать такое расположение камер, чтобы значения dX , dY и dZ были отличными от нуля. За счет этого возможно сделать зависимость результата вычисления от точности их измерения более плавной.

Выводы

В данной статье был разработан и протестирован метод определения расстояния до объекта с использованием изображений, полученных с камер с различными оптическими системами, в условиях отсутствия априорной информации о параметрах данного объекта. Результаты показали возможность определения расстояния до объектов для типовых камер с точностью 90% и выше для матриц с размером пиксела 5,94 мкм. Предложенная математическая модель

также позволяет измерять линейные размеры самих объектов, используя дистанцию до нескольких граничных точек.

Также было проведено исследование чувствительности разработанного метода к точности измерения величины смещения используемых камер друг относительно друга. Исследование показало, что для получения более точных результатов необходимо обеспечить такое расположение камер, чтобы их смещение относительно друг друга было ненулевым во всех трех плоскостях. Данный вывод также объясняет большой разброс результатов работы метода в описанном в статье эксперименте, поскольку в его рамках камеры были расположены таким образом, что отличным от нуля было только смещение dX . Изменение расположения позволит добиться погрешности менее чем полученные в ходе эксперимента 10%.

В качестве путей улучшения данного метода можно отметить возможность введения в рассматриваемую модель оценку нелинейных искажений изображений, в первую очередь дисторсии. Это поможет

повысить точность измерения расстояния описанным методом. Кроме того, данное улучшение позволит использовать камеры с любыми объективами, тогда как актуальная версия метода подразумевает отсутствие на изображениях значительных искажений, ввиду чего при использовании камер с искажающими объектива-

ми, например, типа «рыбий глаз», будет наблюдаться высокая погрешность вычисления результата. Также в дальнейших исследованиях планируется решить задачу измерения геометрических характеристик изображений, используя одну камеру с одним объективом, имеющим выраженные нелинейные искажения.

Список литературы

1. Гурьянов И.С., Кайсина И.А. Перспективы применения стереозрения в БПЛА // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: в 4 т. СПб., 2023. Т. 1. С. 376–381.
2. Khachatryan T.B. A review of visual odometry for UAV autonomous navigation // Вестник Национального Политехнического университета Армении. Информационные технологии, электроника, радиотехника. 2023. № 1. С. 9–17. <https://doi.org/10.53297/18293336-2023.1-9>.
3. Коновалов К.Д., Кулешов С.В. Общая структура системы визуальной навигации БПЛА по видеоданным // Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб., 2023. С.274-276.
4. Коновалов К.Д. Алгоритм планирования маршрута БПЛА в условиях недостатка визуальных ориентиров // Системы анализа и обработки данных. 2024. №2(94). С. 37-54. <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-37-54>
5. Чувагина С.Я. Определение расстояний между объектами на цифровой фотографии // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 7 (135). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/07/98652>.
6. Кулешов С.В., Аксенов А.Ю. Зайцева А.А. О подходе к построению программно-определяемой камеры (обзор) // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, №3. С. 44–49.
7. Кулешов С.В., Аксенов А.Ю. Зайцева А.А. Подход к идентификации источника снимков с цифровых камер // Инновационная наука. 2015. № 12-2. С. 82–86.
8. Александров А.А., Максимов А.Н. Метод измерения диаметра изделий с помощью стереозрения при их изготовлении на токарном станке // Мягкие измерения и вычисления. 2024. № 5 (78). С. 5–14. <https://doi.org/10.36871/2618-9976.2024.05.001>.
9. Laser Distance Measurement by using web camera / A. A. Hamad, D. A. Dhahir, B. R. Mhdi, W. H. Salim // IOSR Journal of Engineering. 2014. Vol. 4, no. 4. P. 25-28.

10. Lee J.M., Hwang K., Jung I.H. Real distance measurement using object detection of artificial intelligence // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. 2021. Vol. 12, № 6. P. 557-563. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i6.1979>.
11. Aung Y.Y., Lwin M.M. Real-time object distance estimation based on YOLOv8 using webcam // 2024 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA), Yangon, Myanmar. 2024. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCA62361.2024.10532829>.
12. Saponara S., Elhanashi A., Gagliardi A. Implementing a real-time, AI-based, people detection and social distancing measuring system for Covid-19 // Journal of Real-Time Image Processing. 2021. Vol. 18, № 3. P. 1937-1947. <https://doi.org/10.1007/s11554-021-01070-6>.
13. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №11 (23). С. 1–10. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-11-996>.
14. Жилияков П. В., Скороход Б.А. Оценка точности (погрешности) в измерениях расстояния до объекта по стереоизображениям // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника-2019: материалы V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Севастополь, 2019. С. 10-15.
15. Чумак А.В., Щербакова Е.А. Алгоритм измерения расстояния до объекта при помощи метода стереоскопического зрения // Студенческий вестник. 2023. № 20 (259). С. 42–45.
16. Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision, A Modern Approach. 2-nd ed. Cambridge: Pearson, 2012. 800 p.

References

1. Guryanov I.S., Kaisina I.A. Prospects for the use of stereo vision in UAVs. In: *Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii. Sbornik nauchnyh statei. XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferenciya. V 4 t.* = *Actual problems of infotelec communications in science and education. Collection of scientific articles. XII International Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference. In 4 vol.* St. Petersburg; 2023. 1:376–381. (In Russ.)
2. Khachatryan T.B. A review of visual odometry for UAV autonomous navigation. *Vestnik Natsional'nogo Politehnicheskogo universiteta Armenii. Informatsionnyye tekhnologii, elektronika, radio-tekhnika* = *Bulletin of National Polytechnic University of Armenia. Information technology, electronics, radio engineering*. 2023. (1): 9–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.53297/18293336-2023.1-9>.

3. Konovalov K.D., Kuleshov S.V. General structure of the UAV visual navigation system based on video data. In: *Trudy 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika» = Proceedings of the 34th International Scientific and Technical Conference «Extreme Robotics»*. St. Petersburg; 2023. P. 456–460. (In Russ.)
4. Konovalov K.D. An algorithm for planning the UAV route in conditions of a lack of visual landmarks. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2024. (2): 37–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-37-54>.
5. Chuvagina S.Y. Determining the distances between objects in a digital photograph. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii = Modern scientific research and innovation*. 2022; (7). (In Russ.). Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2022/07/98652>.
6. Kuleshov S.V., Aksenov A.Y., Zaytseva A.A. An approach to the software defined camera creation (review). *Nauchnoe priborostroenie = Scientific instrumentation*. 2016; 26(3): 44–49. (In Russ.)
7. Kuleshov S.V., Aksenov A.Y., Zaytseva A.A. An approach to identifying the source of digital camera images. *Innovacionnaya nauka = Innovative science*. 2015; (12-2): 82–86. (In Russ.)
8. Aleksandrov A.A., Maksimov A.N. Method of measuring the diameter of lathe manufactured products with stereovision. *Myagkie izmereniya i vychisleniya = Soft measurements and calculations*. 2024; (5): 5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/2618-9976.2024.05.001>.
9. Hamad A. A., Dhahir D. A., Mhdi B. R., Salim W. H. Laser Distance Measurement by using web camera. *IOSR Journal of Engineering*. 2014; 4(4): 25-28.
10. Lee J.M., Hwang K., Jung I.H. Real distance measurement using object detection of artificial intelligence. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*. 2021; 12(6): 557-563. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i6.1979>.
11. Aung Y.Y., Lwin M.M. Real-time object distance estimation based on YOLOv8 using webcam. In: *2024 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA), Yangon, Myanmar*. 2024. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCA62361.2024.10532829>.
12. Saponara S., Elhanashi A., Gagliardi A. Implementing a real-time, AI-based, people detection and social distancing measuring system for Covid-19. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2021; 18(3): 1937-1947. <https://doi.org/10.1007/s11554-021-01070-6>.
13. Loktev D.A., Alfimtsev A.N. Measuring the distance to a moving object using a comprehensive video monitoring system. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013; (11): 1–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-11-996>.
14. Zhilyakov P.V., Skorokhod B.A. Estimation of accuracy (error) in measuring the distance to an object from stereo images. In: *Intellectual'nye sistemy, upravlenie i mek-*

hatronika-2019: Materialy V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov = Intelligent systems, control and mechatronics-2019: Proceedings of the V All-Russian scientific and technical conference of young scientists, post-graduates and students. Sevastopol; 2019. P. 10-15. (In Russ.)

15. Chumak A.V., Shcherbakova E.A. An algorithm for measuring the distance to an object using stereoscopic vision. *Studencheskij vestnik = Student Bulletin*. 2023; (20): 42–45. (In Russ.)

16. Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision, A Modern Approach. 2-nd ed. Cambridge: Pearson; 2012. 800 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Коновалов Константин Дмитриевич, аспирант, лаборатория автоматизации научных исследований Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kodmko@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-6968-7283>

Konstantin D. Konovalov, Post-Graduate Student, Laboratory of Scientific Research Automation, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: kodmko@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-6968-7283>

Оригинальная статья / Original article

УДК 681.5.015

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-123-135>

Разработка метода уменьшения эффекта размытия снимков объектов на конвейерных линиях с помощью подвижных камер

Д.А. Бушуев ¹, С.Н. Огурцов ¹ ✉

¹ Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: clockyuu@gmail.com

Резюме

Цель исследования. В статье исследуется предлагаемый авторами метод уменьшения размытия снимков объектов, движущихся с высокой скоростью на конвейерной ленте, с использованием подвижной камеры, скорость которой синхронизируется с движением конвейерной ленты. Применение этого метода повышает качество получаемых изображений и, как следствие, эффективность автоматизированных систем контроля качества и идентификации объектов на конвейере. Для оценки величины размытости изображений использована метрика на основе анализа частотного спектра получаемого изображения.

Методы. Разработан метод для уменьшения эффекта размытия снимков объектов, основанный на использовании автоматической синхронизирующей системы, уравнивающей скорости движения камеры и объекта на конвейере в момент получения снимка. Для обеспечения возвратно-поступательного движения камеры закреплены на ползунах самоуравновешенного двойного кривошипно-ползунного механизма (КПМ). В статье представлена структура автоматической синхронизирующей системы и приведено описание алгоритма ее работы. Получено условие синхронизации движения камеры и конвейера. Для тестирования системы технического зрения с подвижной камерой, установленной на ползуне КПМ, построен тестовый образец механизма, обеспечивающий возвратно-поступательное движение камеры.

Результаты. Используя тестовый образец механизма, выполнено сравнение между системой технического зрения со статической камерой и системой с подвижной камерой при различных скоростях конвейерной ленты. Полученные результаты показывают, что подвижная камера обеспечивает существенное снижение эффекта размытия, особенно при высоких скоростях.

Заключение. Предложенный метод позволяет значительно уменьшить или полностью устранить эффект размытия, что приводит к существенному улучшению качества получаемых изображений и повышению эффективности работы системы технического зрения в целом. Отмечено, что система требует обеспечения точности синхронизации движения камеры и конвейера, а также ее реализация может быть сопряжена с определенными техническими сложностями. Тем не менее, полученные результаты открывают широкие перспективы для дальнейшего развития и применения метода в различных областях, требующих высокоточной и надежной визуальной информации о движущихся объектах.

Ключевые слова: система технического зрения; конвейерная линия; размытие в движении; подвижная камера; синхронизация; автоматизация; обработка изображений.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания FZWN-2025-0002 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Бушуев Д.А., Огурцов С.Н. Разработка метода уменьшения эффекта размытия снимков объектов на конвейерных линиях с помощью подвижных камер // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 123-135. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-123-135>.

Поступила в редакцию 20.01.2025

Подписана в печать 28.02.2025

Опубликована 14.04.2025

Development of a method for reducing motion blur in images of objects on conveyor lines using moving cameras

Dmitry A. Bushuev¹, Sergey N. Ogurtsov¹ ✉

¹ Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov
46, Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: a.oleynikova.astu@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The article investigates a method proposed by the authors for reducing motion blur in images of objects moving at high speed on a conveyor belt, using a moving camera whose speed is synchronized with the movement of the conveyor belt. Application of this method improves the quality of the obtained images and, consequently, the efficiency of automated quality control and object identification systems on the conveyor. To assess the degree of image blurring, a metric based on the analysis of the frequency spectrum of the obtained image was used.

Methods. A method for reducing motion blur in object images has been developed, based on the use of an automatic synchronization system that equalizes the speeds of the camera and the object on the conveyor at the moment the image is captured. To ensure reciprocating motion of the camera, it is mounted on sliders of a self-balancing double crank-slider mechanism (CSM). The article presents the structure of the automatic synchronization system and provides a description of its operating algorithm. A condition for synchronizing the movement of the camera and the conveyor was derived. To test the machine vision system with a moving camera mounted on the CSM slider, a test prototype of the mechanism providing reciprocating motion of the camera was constructed.

Results. Using the test prototype of the mechanism, a comparison between a machine vision system with a static camera and one with a moving camera at various conveyor belt speeds was made. The obtained results show that the moving camera significantly reduces the effect of blurring, especially at high speeds.

Conclusion. The proposed method allows for a significant reduction or complete elimination of motion blur, leading to a substantial improvement in the quality of the obtained images and enhancing the overall efficiency of the machine vision system. It is noted that the system requires precise synchronization accuracy between the camera and the conveyor, and its implementation may involve certain technical challenges. Nevertheless, the obtained results open up broad prospects for further development and application of the method in various fields requiring high-precision and reliable visual information about moving objects.

Keywords: machine vision system, conveyor line, motion blur, moving camera, synchronization, automation, image processing.

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

Funding. This work was realized in the framework of the project FZWN-2025-0002 on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

For citation: Bushuev D. A., Ogurtsov S. N. Development of a method for reducing motion blur in images of objects on conveyor lines using moving cameras // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 123-135 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-123-135>.

Received 20.01.2025

Accepted 28.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

Современные производственные линии, особенно конвейерные системы, предъявляют всё более высокие требования к скорости, точности и надёжности автоматизированных процессов контроля качества и идентификации объектов [1-3]. Системы технического зрения играют в этих процессах ключевую роль, обеспечивая возможность оперативного анализа и обработки визуальной информации [4-11]. Однако одной из основных проблем, возникающих при работе таких систем на конвейерных линиях, является размытие движущихся объектов на изображении. Традиционный подход с использованием статично установленных камер неизбежно приводит к ухудшению качества изображения при увеличении скорости конвейерной ленты, что существенно затрудняет или делает невозможным выполнение задач идентификации, измерения размеров, обнаружения дефектов и других операций, требующих высокой чёткости изображения.

Существующие методы борьбы с размытием, такие как изменение выдержки камеры и использование мощной подсветки, часто оказываются недостаточно эффективными и могут приводить к другим нежелательным эффектам, например, снижению светочув-

ствительности или перегреву оборудования и наблюдаемых объектов.

Альтернативные подходы, основанные на программной обработке изображений для компенсации размытия, сложны в реализации и не всегда обеспечивают приемлемые результаты в условиях реального времени [12-13]. Например, в патенте [14] описывается способ и электронное устройство для устранения размытости изображения. Это устройство использует итеративный процесс кодирования и декодирования захваченного изображения, применяя операции деконволюции для уменьшения артефактов размытия. Тем не менее, методы устранения размытия изображения непосредственно после его захвата имеют свои ограничения. Необратимая потеря информации в исходном размытом кадре может препятствовать полному восстановлению деталей изображения. Кроме того, вычислительная сложность этих методов может приводить к увеличению времени обработки, что делает их менее подходящими для приложений реального времени, где каждый кадр требует немедленной обработки.

Другой подход к уменьшению размытия движения включает в себя активное управление зеркалом или системой зеркал. В работах [15-20] была пред-

ложена система высокоскоростной видеосъемки без размытия движения, основанная на управлении синхронизацией кадров. Эта система использует стационарную видеокамеру и вращающееся зеркало или полупрозрачный куб, установленное на роторе высокоскоростного электродвигателя. Синхронизируя скорость вращения зеркала с движением объекта на конвейерной ленте, система эффективно компенсирует относительное движение, тем самым сводя к минимуму размытие движения. Сигнал для захвата изображения выдается при достижении синхронизации скоростей. Однако вращательное движение зеркала создает потенциальные искажения изображения. Кроме того, зеркало имеет ограниченный максимальный угол поворота, и требует точного контроля его возврата в исходное положение. Более того, система чувствительна к изменениям расстояния до объекта или его скорости.

Таким образом, существует потребность в разработке нового метода для захвата четких изображений движущихся объектов на конвейерных линиях. Предлагаемое решение должно минимизировать искажения изображения независимо от расстояния, скорости объекта и возможных конфигураций конвейерных линий.

Материалы и методы

В настоящей работе предлагается новый подход к решению проблемы размытия в движении при съёмке объектов на конвейерной линии. Вместо использова-

ния стационарной камеры предлагается использование подвижной камеры, движение которой синхронизировано с движением конвейерной ленты. Такая синхронизация позволяет минимизировать относительную скорость между камерой и объектом, что значительно уменьшает или полностью устраняет эффект размытия.

Устройство для компенсации размытия движущихся объектов в реальном времени включает в себя неподвижную раму, которая является основой устройства и крепится к конвейеру 9, управляемому двигателем 1, серводвигатель 6, закрепленный на раме и осуществляющий движение кривошипно-ползунных механизмов 4 и 5 при помощи цепи 7, которые осуществляют движение ползуну вперед-назад по направляющей 8, на которых закреплены видеокамеры 2 и 3, передающие данные на компьютер с запущенной программой технического зрения. Такая кинематическая схема двойного КПМ является самоуравновешенной и не требует дополнительной балансировки.

Общий вид предлагаемого устройства представлен на рис. 1.

Дополнительно устройство содержит датчик нулевого положения, установленный над серводвигателем, энкодер, установленный на валу конвейера для измерения скорости, программируемый контроллер, который выдает сигнал на видеокамеры для получения кадров и управляет скоростью двигателя на основе данных с энкодера (рис. 2).

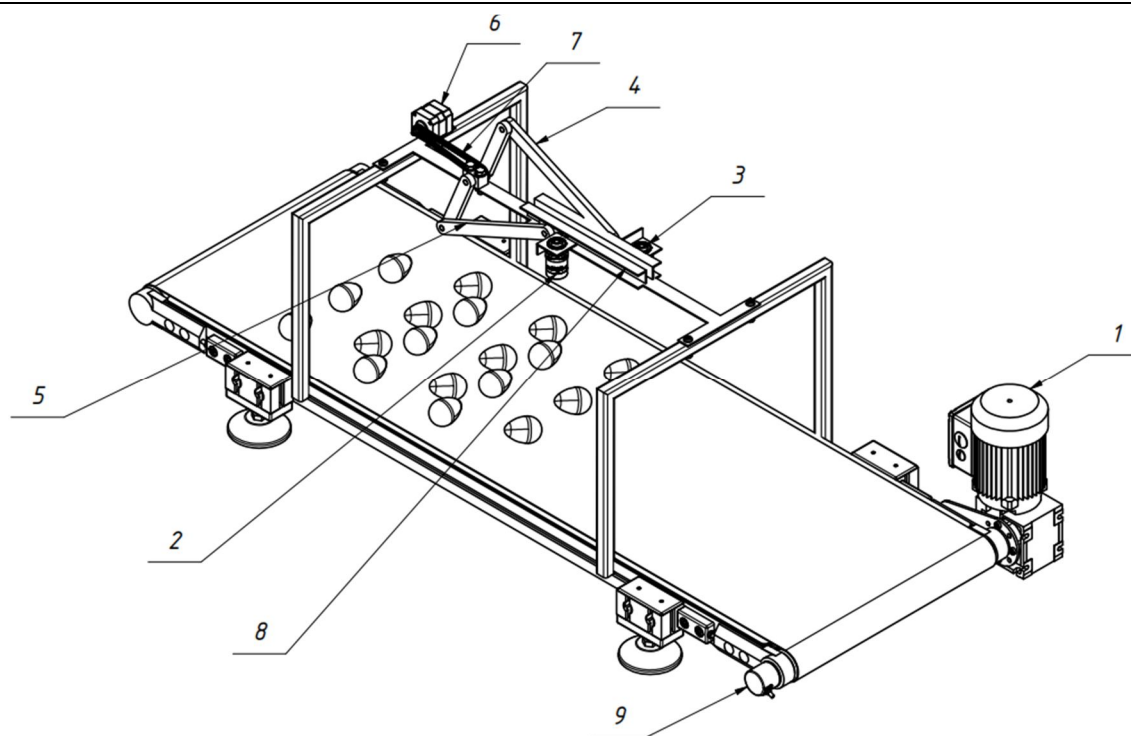


Рис. 1. Общий вид устройства

Fig. 1. General View of the Device

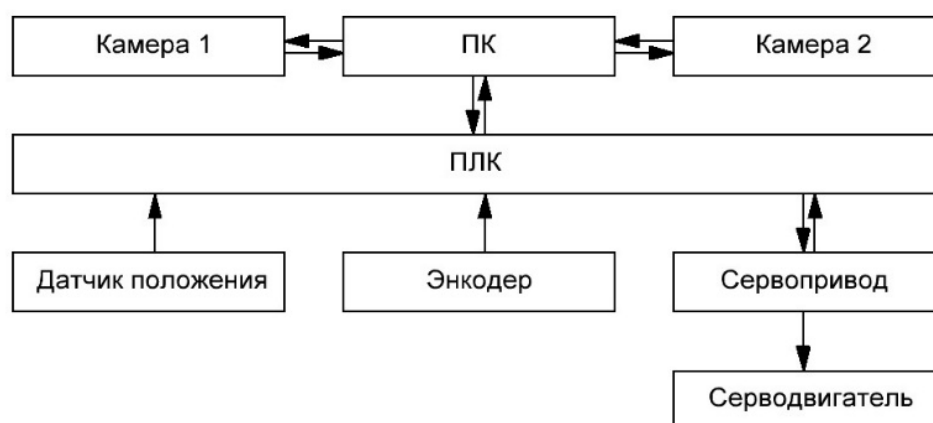


Рис. 2. Функциональная схема связей устройства

Fig. 2. Functional Diagram of Device Connections

Перед началом работы осуществляется определение начального направления движения видеокамер посредством взаимодействия оператора с персональным компьютером, а также идентификация начального положения электродвигателя.

Производится запуск программы технического зрения, а также устройства компенсации размытости изображения в режиме реального времени при помощи датчика нулевого положения. После того, как устройство готово к работе, электро-

двигатель конвейера начинает вращение. На конвейер подаются inspectируемые объекты, которыми могут являться, например, капсульные таблетки или птичьи яйца. Скорость движения конвейера поддерживается постоянной. Программируемый логический контроллер производит подсчет количества импульсов инкрементального энкодера, установленного на валу конвейера, и вычисляет его текущую скорость. Сервоусилитель получает задание скорости из программируемого логического контроллера, и начинает вращение электродвигателя устройства. Электродвигатель приводится в движение сервоусилителем, при помощи цепи, приводит в движение кривошипы, которые обеспечивают плоско-параллельное движение шатунов, осуществляющих линейное движение ползунов, установленных на направляющей, а также закреплённых на них видеокамер. Благодаря жёсткости конструкции, образующей неподвижную пространственную раму, установленную над конвейером, обеспе-

чивается компенсация дрожания видеоизображения, полученного с камер.

Скорость движения видеокамер в определённой точке пути ползуна задаётся таким образом, чтобы она совпадала со скоростью движения конвейера, и, соответственно, всех объектов на нём, благодаря чему удастся обеспечить компенсацию размытости без добавления искажений в изображение. Скорости ползунов вычисляются из уравнения:

$$v_p = \omega \cdot \left(-r \sin \alpha - \frac{r^2 \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \alpha}} \right), \quad (1)$$

где v_p – скорость ползуна; r – радиус кривошипа; l – длина шатуна; α – угол поворота шатуна относительно мёртвой точки; ω – угловая скорость кривошипа (рис. 3). Поскольку угол между кривошипами, а также положение вала электродвигателя известны, имеется возможность вычислить позицию и скорость кривошипов, при которых линейная скорость ползунов будет максимальной (рис. 4).

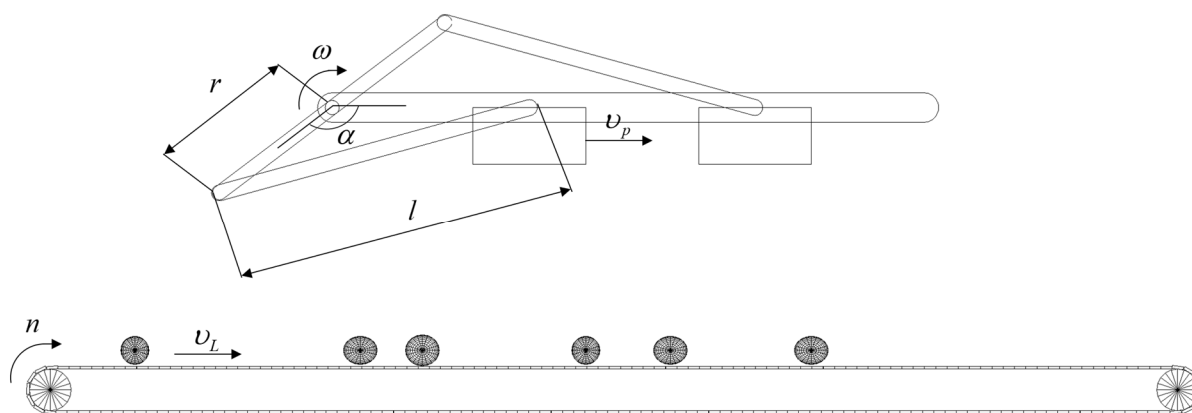


Рис. 3. Схематический чертёж системы

Fig. 3. Schematic drawing of the system

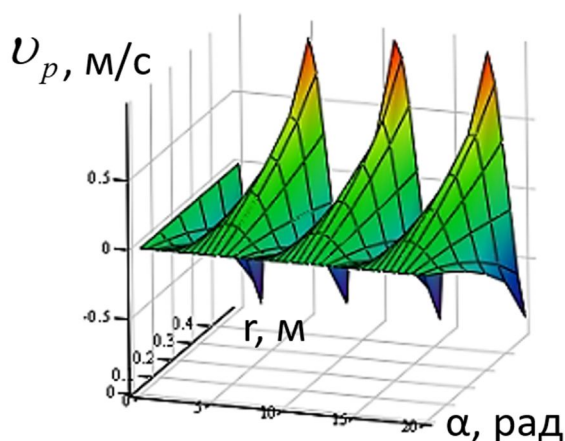


Рис. 4. Зависимость скорости ползуна от длины r и текущего угла кривошипа α при длине шатуна $l = 0,5$ м и угловой скорости кривошипа $\omega = 1$ рад/с

Fig. 4. The slider's velocity dependence on the stroke length r and the current crank angle α , given a connecting rod length $l = 0.5$ m and a crank angular velocity $\omega = 1$ rad/s

Для того, чтобы найти максимальную линейную скорость, необходимо найти производную:

$$\begin{aligned} \frac{dv_p}{d\alpha} = & \frac{r^2 \sin^2 \alpha}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \alpha}} - \\ & - \frac{r^2 \cos^2 \alpha}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \alpha}} - r \cos \alpha - \\ & - \frac{r^4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{(l^2 - r^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{3}{2}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

приравнять её к нулю, и решив полученное уравнение при помощи численных методов определить угол α . Например, при длине шатуна $l = 0,5$ м и длине кривошипа $r = 0,1$ м, угол, при котором обеспечивается максимальная скорость ползунов $\alpha \approx 63,66$ град.

С целью устранения эффекта размытия, необходимо обеспечить угловую

скорость вала электродвигателя устройства такую, чтобы в момент максимальной линейной скорости кривошипов, она равнялась линейной скорости конвейера, которая определяется по формуле

$$v_L = n \cdot \frac{\pi d_1}{60}, \quad (3)$$

где v_L – линейная скорость конвейера; d_1 – диаметр вала; n – угловая скорость электродвигателя конвейера. В свою очередь, угловая скорость электродвигателя определяется как:

$$n = \frac{\Delta N_p}{k \Delta T}, \quad (4)$$

где N_p – количество насчитанных импульсов инкрементального энкодера за время T ; k – коэффициент, равный количеству импульсов на оборот инкрементального энкодера.

В момент, когда одна из видеокамер проходит через расчётное положение, в котором линейная скорость соответствующего ползуна максимальна, программируемый логический контроллер выдаёт сигнал для персонального компьютера, который инициализирует получение кадра для соответствующей видеокамеры. Поскольку начальное положение видеокамер было задано оператором, следовательно, программируемый логический контроллер обеспечивает выдачу сигнала на получение кадра только при сонаправленном движении определённой видеокамеры и конвейера, обеспечивая компенсацию размытия без ошибок.

После получения кадра без размытия, он обрабатывается системой технического зрения. Следующее положение вала электродвигателя устройства, при котором будет проводить съёмку вторая видеокамера, также вычисляется программируемым логическим контроллером. Данные операции происходят циклично в течение всего времени работы устройства.

Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности разработанной системы было проведено сравнение работы системы технического зрения со статической камерой и с подвижной при движении объектов на ленте конвейера с различной скоростью.

Общий вид экспериментальной установки, с помощью которой проводилось тестирование, представлен на рис. 5.

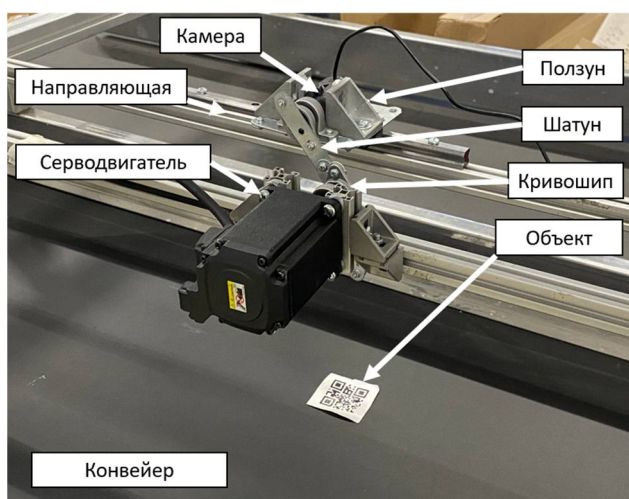


Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки

Fig. 5. General View of the experimental setup

В качестве характеристики эффективности работы системы был использован метод оценки величины размыто-

сти изображений, основанный на анализе частотного спектра. Метод использует двумерное дискретное преобразование Фурье для преобразования изображения $f(x,y)$ в частотную область.

$$F(u,v) = \mathbf{F}\{f(x,y)\}. \quad (5)$$

Функция $F(u,v)$ представляет изображение как сумму синусоидальных волн разных частот и направлений. Высокие частоты соответствуют резким изменениям в изображении (например, краям, деталям). Низкие частоты соответствуют плавным изменениям (например, общему освещению, фону). Размытие "сглаживает" изображение, подавляя высокие частоты. Размытое изображение будет иметь меньше высокочастотных компонентов по сравнению с четким изображением. Затем вычисляется величина частотного спектра в децибелах с использованием логарифмического масштаба, и среднее значение этой величины используется в качестве метрики размытости.

$$L = 20 \cdot \log(|F(u,v)|). \quad (6)$$

В размытом изображении энергия в основном сосредоточена в низких частотах, а высокие частоты будут иметь низкие значения в дБ.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Исходя из данных эксперимента можно сделать вывод, что подвижная камера обеспечивает существенную компенсацию искажений, и может применяться в том числе на больших скоростях конвейерных линий.

Таблица 1. Результаты эксперимента**Table 1.** Experimental Results

Скорость объекта / Object speed	0 см/с	30 см/с	60 см/с	100 см/с
Статичная камера				
Размытость, дБ	148,4	134,9	124,7	104,1
Подвижная камера				
Размытость, дБ	144,2	143,6	138,4	131,2

Выводы

В представленной работе был предложен и исследован новый метод уменьшения эффекта размытия снимков объектов на конвейерных линиях с помощью подвижных камер. В отличие от традиционных систем технического зрения, использующих стационарные камеры, разработанная система основана на использовании подвижной камеры, синхронизированной с движением конвейерной ленты. Экспериментальные результаты продемонстрировали, что предложенный подход позволяет значительно уменьшить или полностью устранить эффект размытия, что приводит к существенному улучшению качества получаемых изображений и, как следствие, к повышению эффективности работы системы технического зрения в целом. Благодаря более чётким изображениям, повышается точность идентификации объектов, измерения их размеров, обнаружения дефектов и выполнения других задач,

критически важных для автоматизации контроля. Однако система требует точной синхронизации движения камеры и конвейера. Кроме того, техническая реализация метода может быть сопряжена с определёнными сложностями, связанными с обеспечением надёжности и долговечности механических узлов, особенно это актуально в условиях функционирования на промышленном производстве.

Тем не менее, полученные результаты открывают широкие перспективы для дальнейшего развития и применения данного подхода. В будущем планируется исследовать возможность использования разработанной системы в сочетании с другими методами борьбы с размытием, такими как адаптивная выдержка и программная компенсация размытия. Также перспективным направлением является разработка более компактных и универсальных систем, которые могут быть легко интегрированы в существующие конвейерные линии без значительных изменений в их конструкции.

Список литературы

1. Огурцов С.Н., Краснопёров Н.С., Бушуев Д.А. Сравнительный анализ способов построения системы технического зрения: неподвижная, широкоугольная и подвижная камеры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 482-486.
2. Огурцов С.Н., Бушуев Д.А. Обзор методов построения систем автоматической сортировки объектов на конвейере с использованием экстремального и нейросетевого управления // Уральский научный вестник. 2023. № 6. С. 3-12.
3. Огурцов С.Н., Бушуев Д.А. Автоматизация подсчёта яиц птицы при помощи системы технического зрения // Научные технологии и инновации (XXV научные чтения): сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород, 2023. С. 843-847.
4. Savelyev N., Ermolaev K. Automation of poultry egg counting through neural network processing of the conveyor video stream // AIP Conference Proceedings. 2022. № 2486. P. 020026. <https://doi.org/10.1063/5.0106117>.
5. Classification of Overlapping Eggs Based on Image Processing / B. Purahong, W. Krungseanmuang, V. Chaowalittawin, T. Pumee, T. Kanjanasurat, A. Lasakul // Journal of Physics Conference Series. 2022. №2261. P. 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2261/1/012023>.
6. Sulistiyowati I., Ichsan H. M., Anshory I. Object Sorting Conveyor with Detection Color Using ESP-32 Camera Python Based on Open-CV // JEECS. Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2024. 9(1): 61-68. <https://doi.org/10.54732/jeecs.v9i1.7>.
7. A Faster and Lighter Detection Method for Foreign Objects in Coal Mine Belt Conveyors. / B. Luo, Z. Kou, C. Han, J. Wu, S. Liu // Sensors. 2023. Vol. 23, № 14. P. 6276. <https://doi.org/10.3390/s23146276>.
8. Smart Counting System Based on Object Detection Using Deep Learning / J. Moon, S. Lim, H. Lee, S. Yu, K.-B. Lee // Remote Sens. 2022. Vol. 14, №15. P. 3761. <https://doi.org/10.3390/rs14153761>.
9. Temporal-Quality Ensemble Technique for Handling Image Blur in Packaging Defect Inspection / G.-J. Son, H.-C. Jung, Y.-D. Kim // Sensors. 2024. Vol. 24, №14. P. 4438. <https://doi.org/10.3390/s24144438>.
10. Vision-Based Sorting Systems for Transparent Plastic Granulate / T. Peršak, B. Viltušnik, J. Hernavs, S. Klančnik // Applied Science. 2020. Vol. 10 №12. P. 4269. <https://doi.org/10.3390/app10124269>.
11. Research on Belt Deviation Fault Detection Technology of Belt Conveyors Based on Machine Vision / X. Wu, C. Wang, Z. Tian, X. Huang, Q. Wang // Machines. 2023. Vol. 11, №12. P. 1039. <https://doi.org/10.3390/machines11121039>.

12. Huseynova G. H., Mammadov J. F. Mathematical and algorithmic support of the technical vision system of flexible production system // *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2023. №4. P. 26-32. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-4-26-32>.
13. Coal Gangue Target Detection Based on Improved YOLOv5s. / S. Wang, J. Zhu, Z. Li, X. Sun, G. Wang // *Applied Science*. 2023. Vol. 13, №20. P. 11220 <https://doi.org/10.3390/app132011220>.
14. Патент США 17/119336, 31.01.2023 «Method and electronic device for deblurring blurred image» // United States Patent №11568518B2 / T. Gollanapalli, K. Marupalli.
15. Murakami K., Hayakawa T., Ishikawa M. Hybrid surface measuring system for motion-blur compensation and focus adjustment using a deformable mirror // *Applied Optics*. 2022. Vol. 61, № 2. P. 429-438. <https://doi.org/10.1364/AO.442987>.
16. Angle of View Switching Method at High-Speed Using Motion Blur Compensation for Infrastructure Inspection / Y. Ezaki, Y. Moko, T. Hayakawa, M. Ishikawa // *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2022. Vol. 34, № 5. P. 985-996. <https://doi.org/10.20965/jrm.2022.p0985>.
17. Hayakawa T., Watanabe T., Ishikawa M. Real-time high-speed motion blur compensation system based on back-and-forth motion control of galvanometer mirror // *Opt. Express*. 2015. Vol.23, № 25. P. 31648-31661.
18. High-speed Imaging Technology Using Motion-blur Compensation for Infrastructure Inspection / T. Hayakawa, Y. Kubota, Y. Moko, Y. Ke, M. Ishikawa // *Japanese Journal of Optics*. 2021. Vol. 50, № 2. P. 61-67.
19. Extension of the Capture Range Under High-Speed Motion Using Galvanometer Mirror / Y. Ezaki, Y. Moko, H. Ikeda, T. Hayakawa, M. Ishikawa // 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. P. 1854-1859. <https://doi.org/10.1109/AIM43001.2020.9159039>.
20. High-speed motion blur compensation system in infrared region using galvanometer mirror and thermography camera / Y. Kubota, T. Hayakawa, Y. Ke, Y. Moko, M. Ishikawa // *SPIE Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2020. P. 1137919. <https://doi.org/10.1117/12.2558450>.

References

1. Ogurtsov S.N., Krasnopyorov N.S., Bushuev D.A. Comparative analysis of methods for constructing a machine vision system: stationary, wide-angle and moving cameras. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki = Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences*. 2024; (5): 482-486 (In Russ.).
2. Ogurtsov S.N., Bushuev D.A. Review of methods for constructing automatic object sorting systems on a conveyor using extremal and neural network control. *Ural'skiy Nauchnyy Vestnik = Ural Scientific Bulletin*. 2023; (6): 3-12 (In Russ.).

3. Ogurtsov S.N., Bushuev D.A. Automation of poultry egg counting using a machine vision system. In: *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii. Sbornik Dokladov Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii (XXV Nauchnye Chteniya) = High-tech technologies and innovations. Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference (XXV Scientific Readings)*. Belgorod; 2023; (25): 843-847 (In Russ.).
4. Savelyev N., Ermolaev K.. Automation of poultry egg counting through neural network processing of the conveyor video stream. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2486 (1):020026. <https://doi.org/10.1063/5.0106117>.
5. Purahong B., Krungseanmuang W., Chaowalittawin V., Pumee T., Kanjanasurat T., Lasakul A. Classification of Overlapping Eggs Based on Image Processing. *Journal of Physics Conference Series*. 2022. 2261(1):012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2261/1/012023>.
6. Sulistiyowati I., Ichsan H. M., Anshory I. Object Sorting Conveyor with Detection Color Using ESP-32 Camera Python Based on Open-CV. *JEECS. Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2024; 9(1):61-68. <https://doi.org/10.54732/jeecs.v9i1.7>.
7. Luo B., Kou Z., Han C., Wu J., Liu S. A Faster and Lighter Detection Method for Foreign Objects in Coal Mine Belt Conveyors. *Sensors*. 2023; 23(14): 6276. <https://doi.org/10.3390/s23146276>.
8. Moon J., Lim S., Lee H., Yu S., Lee K.-B. Smart Counting System Based on Object Detection Using Deep Learning. *Remote Sens*. 2022; 14(15):3761. <https://doi.org/10.3390/rs14153761>.
9. Son G.-J., Jung H.-C., Kim Y.-D. Temporal-Quality Ensemble Technique for Handling Image Blur in Packaging Defect Inspection. *Sensors*. 2024; 24(14):4438. <https://doi.org/10.3390/s24144438>.
10. Peršak T., Viltušnik B., Hernavs J., Klančnik S. Vision-Based Sorting Systems for Transparent Plastic Granulate. *Applied Science*. 2020; 10(12):4269 <https://doi.org/10.3390/app10124269>.
11. Wu X., Wang C., Tian Z., Huang X., Wang Q. Research on Belt Deviation Fault Detection Technology of Belt Conveyors Based on Machine Vision. *Machines*. 2023; 11(12):1039. <https://doi.org/10.3390/machines11121039>.
12. Huseynova G. H., Mammadov J. F. Mathematical and algorithmic support of the technical vision system of flexible production system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2023; (4):26-32. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-4-26-32>.
13. Wang S., Zhu J., Li Z., Sun X., Wang G. Coal Gangue Target Detection Based on Improved YOLOv5s. *Applied Science*. 2023; 13(20):11220. <https://doi.org/10.3390/app132011220>.
14. US Patent 17/119336, 01/31/2023 "Method and electronic device for deblurring blurred image" // United States Patent No. 11568518B2 / T. Gollanapalli, K. Marupalli.
15. Murakami K., Hayakawa T., Ishikawa M. Hybrid surface measuring system for motion-blur compensation and focus adjustment using a deformable mirror. *Applied Optics*. 2022; 61(2):429-438. <https://doi.org/10.1364/AO.442987>.

16. Ezaki Y., Moko Y., Hayakawa T., Ishikawa M.: Angle of View Switching Method at High-Speed Using Motion Blur Compensation for Infrastructure Inspection. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2022; 34(5): 985-996. <https://doi.org/10.20965/jrm.2022.p0985>.
17. Hayakawa T., Watanabe T., Ishikawa M. Real-time high-speed motion blur compensation system based on back-and-forth motion control of galvanometer mirror. *Opt. Express*. 2015; 23(25):31648-31661.
18. Hayakawa T., Kubota Y., Moko Y., Ke Y., Ishikawa M. High-speed Imaging Technology Using Motion-blur Compensation for Infrastructure Inspection. *Japanese Journal of Optics*. 2021. 50(2):61-67.
19. Ezaki Y., Moko Y., Ikeda H., Hayakawa T., Ishikawa M. Extension of the Capture Range Under High-Speed Motion Using Galvanometer Mirror. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2020; 1854-1859. <https://doi.org/10.1109/AIM43001.2020.9159039>.
20. Kubota Y., Hayakawa T., Ke Y., Moko Y., Ishikawa M. High-speed motion blur compensation system in infrared region using galvanometer mirror and thermography camera. *SPIE Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2020; 1137919. <https://doi.org/10.1117/12.2558450>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бушуев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: dmbushuev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5433-2463>

Dmitry A. Bushuev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: dmbushuev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5433-2463>

Огурцов Сергей Николаевич, аспирант кафедры технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: clockyouu@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4867-2044>

Sergey N. Ogurtsov, Post-Graduate Student of the Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: clockyouu@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4867-2044>

УДК 621.373.1

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-136-154>

Метод измерения температуры на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на термометр сопротивления

О. Г. Бондарь¹, Е. О. Брежнева¹ ✉, А. И. Калмыков¹

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель работы: повышение быстродействия и точности измерения температуры резистивными датчиками (РДТ) при удаленном двухпроводном подключении в распределенных системах мониторинга. Разработка и реализация метода измерения температуры на основе обработки результатов интегрирования начального участка переходного процесса разряда конденсатора, шунтирующего термометр сопротивления, оценка параметров модели определения времени интегрирования и апробация метода на экспериментальном стенде. Определение погрешностей измерения сопротивления РДТ методом интегрирования начального участка переходного процесса с применением линейной модели определения времени интегрирования и оценка эффективности предложенного решения по сравнению с альтернативными методами.

Методы: в основе математического описания метода лежит теория электрических цепей. Оценка эффективности метода проводилась по результатам экспериментальных исследований. При разработке линейной модели определения времени интегрирования строилась линейная регрессионная модель, рассчитывались относительные погрешности по усредненным результатам многократных измерений.

Результаты: предложен и исследован метод определения сопротивлений резистивных датчиков температуры на основе обработки результатов интегрирования начального участка переходного процесса разряда конденсатора на РДТ при двухпроводном подключении в распределенных системах мониторинга. Приведено математическое описание метода, на основе которого разработан алгоритм вычисления сопротивления РДТ, исключаящий влияние сопротивления соединительных проводов на результаты измерений. В основе разработанного алгоритма лежит интегрирование переходного процесса разряда конденсатора (накопление и суммирование отсчетов) на ограниченном временном интервале с сохранением результатов в середине (t_1) и конце интервала (t_2) и расчет сопротивления РДТ по полученным параметрам. Определены параметры модели подстройки времени интегрирования, оценены погрешности измерения. Проведена апробация метода с помощью экспериментального стенда на базе микроконтроллера ATmega328 и магазина сопротивлений P4831 с классом точности 0,02.

Заключение: представленные в работе результаты исследования и апробации метода измерения температуры РД демонстрируют его эффективность для снижения погрешностей измерения, вызванных влиянием сопротивления соединительных проводов. Применение предложенных методов измерения и алгоритмов обработки позволяет использовать двухпроводное подключение датчиков в распределенных системах мониторинга при сохранении точности измерений на уровне более сложных и дорогостоящих трех- и четырехпроводных схем, исключив влияние сопротивления соединительных проводов. Применение описанного в работе метода интегрирования напряжения на начальном участке переходного процесса позволяет не только

повысить быстродействие, но и обеспечить требуемый уровень точности измерений. Проведенные экспериментальные исследования показали, что относительные погрешности измерения предложенным авторами методом при применении линейной модели определения времени интегрирования не превышают 0,07% в диапазоне изменения номинальных сопротивлений 1-4 кОм (соответствует диапазону температур, измеряемых платиновым термометром сопротивления, 0-600 °C) при искусственном увеличении суммарного сопротивления соединительных проводов до величины, превышающей 200 Ом.

Предложенный метод может быть применен в системах мониторинга, использующих РД, размещенных на значительном удалении от измерительного блока.

Ключевые слова: сопротивление; температура; резистивный датчик; погрешности измерения; двухпроводное подключение; быстродействие; микроконтроллер; метод интегрирования; интервал.

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

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Калмыков А.И. Метод измерения температуры на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на термометр сопротивления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 136-154. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-136-154>.

Поступила в редакцию 10.12.2024

Подписана в печать 28.02.2025

Опубликована 14.04.2025

Method for temperature measurement based on integration of the transient process part of the condenser discharge on a resistance thermometer

Oleg G. Bondar ¹, Ekaterina O. Brezhneva ¹ ✉, Andrey I. Kalmykov ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Abstract

Purpose: improving the speed and accuracy of temperature measurement by a resistive sensor (RTD) with remote two-wire connection in distributed monitoring systems. Development and implementation of a temperature measurement method based on the processing of the integration results of the initial phase of the transient discharge process of a capacitor shunting a resistance thermometer, evaluation of the parameters of the integration time determination model and testing of the method on an experimental bench. Determination of errors in measuring RTD resistance by integrating the initial phase of the transition process using a linear model for determining the integration time and evaluating the effectiveness of the proposed solution in comparison with alternative methods.

Methods. The mathematical description of the method is based on the theory of electrical circuits. The effectiveness of the method was evaluated based on the results of experimental studies. When developing a linear model for determining the integration time, a linear regression model was built, and relative errors were calculated based on the average results of multiple measurements.

Results. A method for determining the resistances of resistive temperature sensors based on the processing of the integration results of the initial phase of the transient capacitor discharge process on a two-wire connection in distributed monitoring systems is proposed and investigated.

A mathematical description of the method is given, on the basis of which an algorithm for calculating the resistance of the RTD has been developed, eliminating the influence of the resistance of the connecting wires on the measurement results. The developed algorithm is based on the integration of the transient process of capacitor discharge (accumulation and summation of samples) over a limited time interval, while preserving the results in the middle (t_1) and the end of the interval (t_2) and calculating the resistance of the RTD based on the obtained parameters.

The parameters of the integration time adjustment model are determined, and measurement errors are estimated. The method was tested using an experimental stand based on an ATmega328 microcontroller and a P4831 resistance store with an accuracy class of 0.02.

Discussion. The results of the research and testing of the RD temperature measurement method presented in the paper demonstrate its effectiveness in reducing measurement errors caused by the influence of the resistance of connecting wires. The application of the proposed measurement methods and processing algorithms makes it possible to use two-wire sensor connections in distributed monitoring systems while maintaining measurement accuracy at the level of more complex and expensive three- and four-wire circuits, eliminating the influence of the resistance of the connecting wires. The application of the voltage integration method described in the work at the initial stage of the transient process allows not only to increase performance, but also to ensure the required level of measurement accuracy. Experimental studies have shown that the relative measurement errors of the method proposed by the authors when using the linear model for determining the integration time do not exceed 0.07% in the range of nominal resistances of 1-4 kOhm (corresponds to the temperature range measured by a platinum resistance thermometer, 0-600 °C) with an artificial increase in the total resistance of the connecting wires to a value exceeding 200 ohms.

The proposed method can be applied in monitoring systems using taxiways located at a considerable distance from the measuring unit.

Keywords: resistance; temperature; resistive sensor; measurement errors; two-wire connection; performance; microcontroller; integration method; interval.

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

For citation. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Kalmykov A. I. Method for temperature measurement based on integration of the transient process part of the condenser discharge on a resistance thermometer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 136-154 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-136-154>.

Received 10.12.2024

Accepted 28.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

Современные системы мониторинга и контроля параметров воздушной среды, автоматизированные системы управления технологическими процессами и системы сбора данных содержат в своей структуре два основных блока: блок датчиков и измерительный блок [1-8]. При удаленном размещении блоков возникают погрешности, вызванные влиянием сопротивления соединительных проводов на результаты измерения выходных сигналов

датчиков, например резистивных датчиков температуры. Учитывая вышесказанное, повышение точности измерения сопротивления РД при их удаленном подключении является актуальным научно-техническим направлением, которому посвящено значительное количество научных публикаций [9-16].

Среди основных направлений следует выделить: технические и схемотехнические решения, применение различных алгоритмов и методов измерения и их комбинирование. Кроме того,

существуют компенсационные методы, требующие измерения и учета сопротивления соединительных проводов, и методы, исключаящие их влияние на результаты измерения.

К техническим решениям относятся различные способы организации соединения блоков, когда кроме классического двухпроводного соединения применяются более дорогостоящие трех- и четырехпроводные схемы подключения, а также цифровые и беспроводные каналы связи. Беспроводные решения требуют подвода энергии и увеличивают стоимость каждой рабочей точки за счет дублирования электроники в многоканальных системах.

В [8] рассмотрен вариант линеаризации зависимости выходного сигнала мостовой схемы от величины сопротивления резистивного датчика температуры. Исследована схема компенсации влияния обратной связи, которой охватывается мост, и приведены результаты исследования схемы в LabView.

В [9] рассмотрен прямой трёхпроводный интерфейс резистивного датчика с микроконтроллером. Схема, содержащая опорный резистор, конденсатор, дополнительный резистор, ограничивающий ток заряда конденсатора, трёхпроводный интерфейс подключения РДТ, и использующая пять цифровых двунаправленных выводов микроконтроллера, измеряет 4 интервала разряда конденсатора от максимального напряжения до заданного уровня на различные элементы схемы, и на их основе вычисляет сопротивление РДТ.

В работе [10] применена трёхпроводная мостовая схема подключения РДТ, в которой питание половины моста, содержащей делитель РДТ и сопротивления проводов линии, осуществляется стабильным током за счёт охвата моста отрицательной обратной связью. Благодаря стабилизации тока падения напряжений на проводниках соединительной линии одинаковы и компенсируются за счёт их вычитания на измерительной диагонали моста. Вариант трёхпроводного подключения, содержащий три операционных усилителя и два аналоговых переключателя, осуществляет промежуточное преобразование сопротивления РДТ во временной интервал, требует три такта преобразования [11].

Рассмотренные схемы обладают относительно высокой сложностью, усугубляемой в многоканальных системах избытком проводов и коммутаторами.

Поэтому имеется значительное число работ, ориентированных на разработку способов подавления влияния сопротивления проводников в двухпроводных схемах подключения РДТ [12-16].

Простейшее решение основано на подключении к РДТ двух диодов. Один диод включается последовательно с РД, а второй шунтирует соединительную линию на стороне РДТ и направлен встречно первому диоду. Конец соединительной линии подключен в качестве сопротивления классического мультивибратора на таймере NE555 [12]. Измеряемое сопротивление пропорционально разности времён заряда и разряда конденсато-

ра мультивибратора. Недостатком решения является существенная погрешность, связанная с различием падений напряжения на диодах, работающих при разных токах заряда и разряда.

В [13] неидентичность вольтамперных характеристик (ВАХ) диодов предложено компенсировать на основе измерения напряжений на входе соединительной цепи, при возбуждении рассмотренной в [12] схемы, двухполярными трехуровневыми импульсами тока через соединительный провод. При этом необходимые вычисления выполняются цифровым блоком обработки сигналов. Погрешность измерения сопротивления РДТ находится в пределах $\pm 0,98$ Ом, при длине соединительного провода, равной 30 м (диапазон колебаний температуры окружающей среды - от 30 °С до 70 °С). Недостатком схемы является её высокая сложность и слабая защищённость от помех.

Другой вариант улучшения решения, предложенного в [12], представлен в [14]. Измерительная цепь, включённая в цепь обратной связи операционного усилителя, возбуждается разнополярными импульсами тока. При одинаковой величине положительного и отрицательного тока среднее значение напряжения на выходе фильтра нижних частот пропорционально величине сопротивления РДТ. Однако и в этом случае неидентичность ВАХ диодов вносит существенный вклад в погрешность измерения. Это приводит к необходимости тщательного подбора пар диодов с тесной тепловой

связью между ними. Обычно в подобных схемах используются переходы сдвоенных n-p-n транзисторов.

В [15] для определения сопротивления РДТ осуществляется измерение двух времён разряда конденсатора, включённого параллельно РДТ, на входной делитель напряжения, подключённый к двум управляемым выводам микроконтроллера, до достижения уровня логического нуля на каждом из них. Заряд конденсатора осуществляется переводом выводов МК в режим выхода и установкой уровня логической единицы на них. Для расчёта РДТ необходимо знать значения сопротивлений резисторов и ёмкости и обеспечить их стабильность. Для ослабления влияния сопротивления проводников на результат измерения РДТ необходимо выбирать сопротивление делителя много большим сопротивлению проводников. Для повышения точности измерения в работе предложен улучшенный метод, базирующийся на измерении трёх времён разряда конденсатора до фиксированного уровня, контролируемого в трёх точках делителя из трёх последовательных сопротивлений. В экспериментальных исследованиях при измерении сопротивлений в диапазоне 100 - 2000 Ом максимальные систематические погрешности составляют 0,15% для первого метода и 0,12% для второго. При этом время измерения достигает 1 мс при интервале дискретизации 10 нс. Устройство реализуется на FPGA.

В [16] предложен компенсационный способ, в котором сопротивление про-

водника при двухпроводном подключении определяется по результатам измерения напряжения, на входе измерительного устройства, образованного при протекании известного тока через обратно смещённый стабилитрон, подключенный параллельно датчику температуры, и соединительную линию. Апробация метода проводилась в диапазоне изменения сопротивлений РДТ 848–2120 Ом, а сопротивление соединительного провода составляло менее 50 Ом. Предложенное решение в указанных условиях обеспечивает погрешности измерения сопротивления датчика в пределах ± 1 Ом. Для снижения погрешности определения РДТ следует использовать стабилитрон с высокой температурной стабильностью, заранее определённым напряжением стабилизации и его малой чувствительностью к изменению тока и малым током утечки при напряжении ниже напряжения пробоя. Высокое напряжение стабилизации может привести к существенному саморазогреву РДТ.

Рассмотренные методы измерения сопротивления РДТ опираются на измерение временных интервалов или напряжений и требуют для представления результатов измерения в цифровой форме использования счётчиков или аналого-цифровых преобразователей (АЦП), устройств управления и обработки данных. Поэтому в их состав должны входить микроконтроллеры, АЦП, аналоговые коммутаторы или специализированные устройства на программируемых логических интегральных схемах. С учётом

чувствительности длинных линий к индустриальным помехам и того, что большинство рассмотренных способов определения РДТ опираются на результаты однократных измерений, требуются меры по подавлению влияния помех.

Авторами работы запатентован способ определения сопротивления РДТ на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на сопротивление датчика. Способ направлен на снижение погрешностей измерения и повышение быстродействия, а также исключает влияние сопротивления соединительных проводов¹. При этом устройство, реализующее данный способ, базируется на микроконтроллере (МК) со встроенным АЦП. Измерительная цепь устройства предельно проста и состоит из опорного резистора, РДТ и конденсатора, шунтирующего РДТ.

Оценка эффективности предложенного решения требует разработки алгоритмического обеспечения, технической реализации метода и его экспериментальной апробации.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема устройства измерения сопротивления РДТ, позволяющая реализовать ряд способов измерения его сопротивления. Цепь, представляющая собой последовательное соединение опор-

¹ Способ измерения температуры: пат RU № 2824738. С1 / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, М.А. Брежнев // Изобретения. Полезные модели. 2024. № 23.

ного резистора и РДТ, питается импульсным напряжением длительностью, обеспечивающей полный заряд шунтирующего конденсатора, и скважностью, гарантирующей минимальный разогрев резистора протекающим током. Напряжение питания измерительной цепи снимается с вывода 1 МК.

В конце процесса заряда конденсатора определяется падение напряжения на опорном резисторе (R_{REF}) как разность напряжений на входах 2 и 3 мультимплексора встроенного АЦП микроконтроллера. При этом результаты многократных измерений усредняются, что

позволяет ослабить влияние шумов, в том числе квантования. При отключении напряжения питания измерительной цепи за счёт перевода вывода 1 МК в режим ввода, конденсатор разряжается, питая резистивный датчик в цикле измерения. При этом встроенный мультимплексор подключает к АЦП вывод 3 и измеряется напряжение на соединительной линии (А-В). Ток в соединительных проводах не течет, так как входное сопротивление встроенного АЦП очень велико (свыше 100 Мом), что позволяет исключить влияние их сопротивлений R_W на результаты измерений.

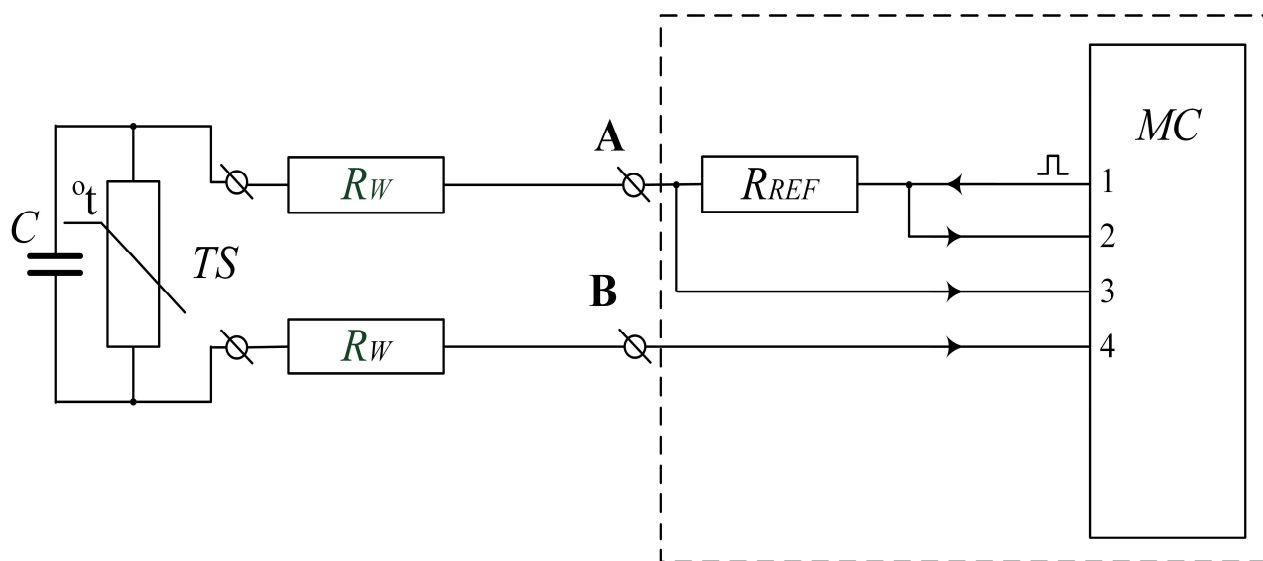


Рис. 1. Устройство измерения сопротивления РДТ при двухпроводном подключении:

MC — микроконтроллер; **R_{REF}** — опорный резистор; **R_W** — сопротивление двухпроводной линии; **TS** — резистивный датчик температуры; **C** — конденсатор

Fig. 1. Device for measuring the resistance of the RTD with a two—wire connection:

MC — microcontroller; **R_{REF}** — reference resistor; **R_W** — resistance of a two-wire line; **TS** — resistive temperature sensor; **C** — capacitor

Простейшая реализация измерительного алгоритма, использующая данную схему реализации устройства, заключается в измерении напряжения на зажимах А, В непосредственно после отклю-

чения питания измерительной цепи через вывод 1 МК [17]. При всей простоте такого подхода его недостатком является влияние на результаты измерения переходного колебательного процесса, воз-

никающего при отключении линии с распределёнными параметрами от источника напряжения. Поскольку сопротивление РДТ определяется по однократному измерению напряжения на нём, то на результат существенно влияют помехи, наводимые соединительную линию.

Влияние переходного процесса в линии можно исключить при оценке напряжения на РДТ после отключения питания по результатам определения параметров переходного процесса на основе измерения напряжения в моменты времени, удалённые от его начала. В [18] вычисление падения напряжения на РД, осуществляется по значениям напряжения, полученным в процессе разряда конденсатора в моменты времени t_1 и t_2 , причём $t_2 = 2t_1$.

Однако и при таком подходе на результаты однократных измерений сказывается влияние помех и шумов квантования.

Ослабить влияние вышеперечисленных факторов позволяет интегрирующий метод, заключающийся в интегрировании напряжения на РД в течение всего времени разряда конденсатора. При этом в вычислительном алгоритме используются результаты интегрирования в конце интервала t_1 и по завершении разряда конденсатора [19].

В [20] представлены результаты математического моделирования интегрирующего способа измерения, определены оптимальные значения первого интервала интегрирования t_1 и емкости конденсатора при заданном шаге кван-

тования. Показано, что преимуществом способа является отсутствие необходимости в проведении многократных измерений, меньшая величина среднеквадратической погрешности в сравнении с двухточечным методом. Недостатком метода является увеличение влияния шумов квантования, проявляющееся в процессе измерений на втором интервале интегрирования, вызванное уменьшением величины напряжения на РД.

В [21] представлены результаты исследования способа измерения, опирающегося на результаты интегрирования переходного процесса разряда конденсатора на РДТ и использующего линейную модель определения длительности интервала интегрирования, зависящего от величины сопротивления РДТ и, следовательно, от измеряемой температуры. Оценка величины интервала интегрирования осуществляется на основе грубой оценки сопротивления РДТ по результатам однократного измерения напряжения непосредственно после отключения питания измерительной цепи.

Наиболее совершенным из рассмотренных способов измерения является способ, представленный в работе¹. В соответствии с этим способом напряжение на РДТ при полном заряде конденсатора определяется по результатам интегрирования начального участка переходного процесса разряда конденсатора на

¹ Способ измерения температуры: пат RU № 2824738. С1 / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, М.А. Брежнев // Изобретения. Полезные модели. 2024. № 23.

сопротивление датчика. Сопротивление РДТ оценивается по отношению падений напряжения на опорном резисторе и РДТ, а температура по характеристике преобразования.

Процесс определения сопротивления РДТ начинается с полного заряда конденсатора подачей напряжения на измерительную цепь с вывода 1 МК (рис. 2). В конце заряда на основе многократных измерений определяется среднее значение напряжения на опорном резисторе. После этого МК отключает питание измерительной цепи и начинается процесс разряда конденсатора. Измеряется напряжение на входе соединительной линии, осуществляется оценка сопротивления РДТ и времени интегрирования.

Далее осуществляется интегрирование напряжения переходного процесса (накопление отсчетов с заданной частотой, представляющих собой результаты измерения напряжения между зажимами А и В). Накопление отсчетов длится в течение интервала времени t_2 , с сохранением промежуточного значения в середине этого интервала (момент времени t_1). Результаты суммирования отсчетов умножаются на интервал дискретизации и сохраняются как S_1 и S_2 , соответственно.

Интеграл напряжения на конденсаторе за временной интервал t от момента начала разряда рассчитывается согласно следующему выражению:

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

где $\tau = R_{TS}C$ – постоянная времени, цепи РДТ при отключенном источнике

питания; U_{TS} – напряжение на РДТ при полностью заряженном конденсаторе.

Значение интеграла на интервалах от начала разряда конденсатора до момента времени t_1 и $t_2 = 2t_1$:

$$\begin{cases} S_1 = \tau U_{TS} [1 - \exp(-t_1/\tau)] \\ S_2 = \tau U_{TS} [1 - \exp(-2t_1/\tau)] \end{cases} \quad (1)$$

Постоянная времени определится через отношение S_2/S_1 :

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{S_1} &= \frac{1 - \exp(-2t_1/\tau)}{1 - \exp(-t_1/\tau)} = \\ &= \frac{[\exp(2t_1/\tau) - 1] \cdot \exp(t_1/\tau)}{[\exp(t_1/\tau) - 1] \cdot \exp(2t_1/\tau)} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{S_1} &= \frac{(\exp(t_1/\tau) + 1)(\exp(t_1/\tau) - 1)}{(\exp(t_1/\tau) - 1)} \times \\ &\times \frac{1}{\exp(t_1/\tau)} = 1 + \exp(-t_1/\tau). \end{aligned}$$

Отсюда:

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

Подстановкой постоянной времени в первое уравнение системы (1), определяется начальное значение напряжения на РДТ:

$$U_{TS} = -S_1 \frac{\ln(S_2 / S_1 - 1)}{t_1 (2 - S_2 / S_1)}. \quad (2)$$

Величина сопротивления РДТ определяется в соответствии с выражением

$$R_{TS} = R_{REF} \cdot U_{TS} / U_{REF}. \quad (3)$$

Температура датчика определяется по характеристике преобразования термометра РДТ. Для платиновых термометров при положительных температу-

рах используется аналитическая зависимость Каллендара-Ван Дюзена:

$$R(T)=R_0(1+\alpha T+\beta T^2), \quad (4)$$

где $R(T)$ – сопротивление РДТ при температуре T °С; R_0 – сопротивление РДТ при 0 °С; α , β – коэффициенты. Альтернативный вариант – вычисление по градуировочной таблице, размещаемой в памяти МК.

Длительность интервала t_1 определяется по измеренному напряжению на опорном резисторе, напряжению на зажимах соединительных проводов, измеряемому непосредственно после отключения питания, и начальному значению временного интервала t_{10} при номинальном значении сопротивления РДТ. Оптимальное значение временного интервала t_{10} определяется эмпирически по результатам экспериментальных исследований.

Ниже приведен обобщенный алгоритм измерений сопротивления РДТ.

1. По результатам многократных измерений вычисляется напряжение опорного резистора U_{REF} как разность измеренных значений напряжений питания и на выходе делителя при включенном питании в установившемся режиме в момент полного заряда конденсатора.

2. Отключение питания, измерение U_{TS} и интегрирование (суммирование) на интервалах t_1 и t_2 . При этом значение U_{TS} равно напряжению на РДТ в отсутствие тока на соединительных проводах.

3. Сохранение сумм накопленных значений U_{TS} , умноженных на интервал

дискретизации Δt , измеренных на зажимах соединительных проводов на интервалах t_1 и t_2 в переменные S_1 и S_2 соответственно, с последующей коррекцией в соответствии с методом трапеций.

4. Расчет напряжения на РДТ в соответствии с выражением (2).

5. Расчет сопротивления РДТ в соответствии с выражением (3).

6. Определение температуры из (4).

Осциллограмма напряжения на входе соединительной линии (А-В) представлена на рис. 2. Вертикальные участки на диаграмме в моменты выключения и последующего включения напряжения питания цепи РДТ обусловлены исчезновением и появлением падения напряжения на сопротивлении проводников соединительной линии из-за исчезновения и появления тока в соединительной линии.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились на экспериментальном стенде на базе МК *ATmega328* с магазином сопротивлений *P4831* с классом точности 0,02 (рис. 3). Последовательно с РДТ установлено два резистора, каждый сопротивлением 120 Ом, имитирующие сопротивление соединительных проводов. Выбор МК обусловлен наличием относительно быстрого АЦП с разрешением 10 бит, обладающим очень высоким входным сопротивлением (около 100 Мом), позволяющим пренебречь сопротивлением датчика и проводов без использования дополнительного буферного усилителя.

Немаловажным обстоятельством является низкая стоимость и доступность прототипных плат и бесплатных средств разработки программного обеспечения. Сопротивления опорного резистора целесообразно выбрать примерно равны-

ми среднему геометрическому значению сопротивления РДТ на границах диапазона температур, в котором требуется обеспечить минимальную погрешность измерений.

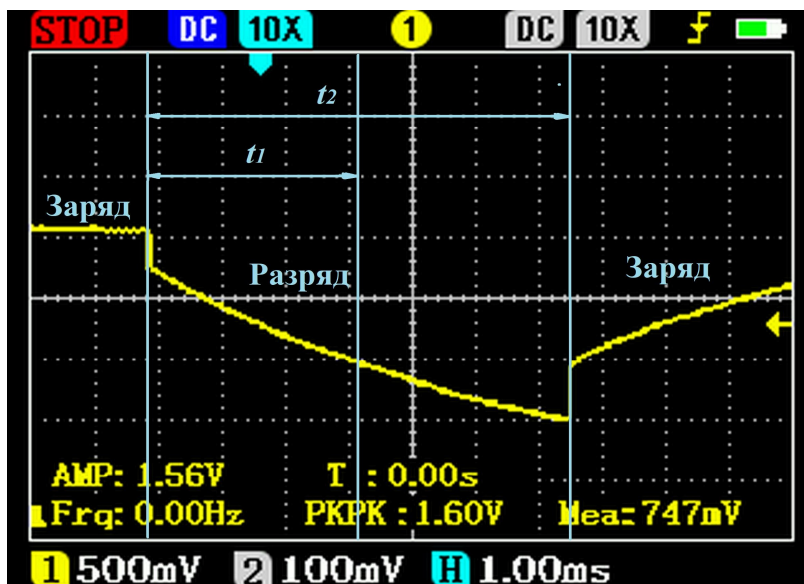


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на зажимах линии подключения датчика

Fig. 2. Voltage waveform at the terminals of the sensor connection line

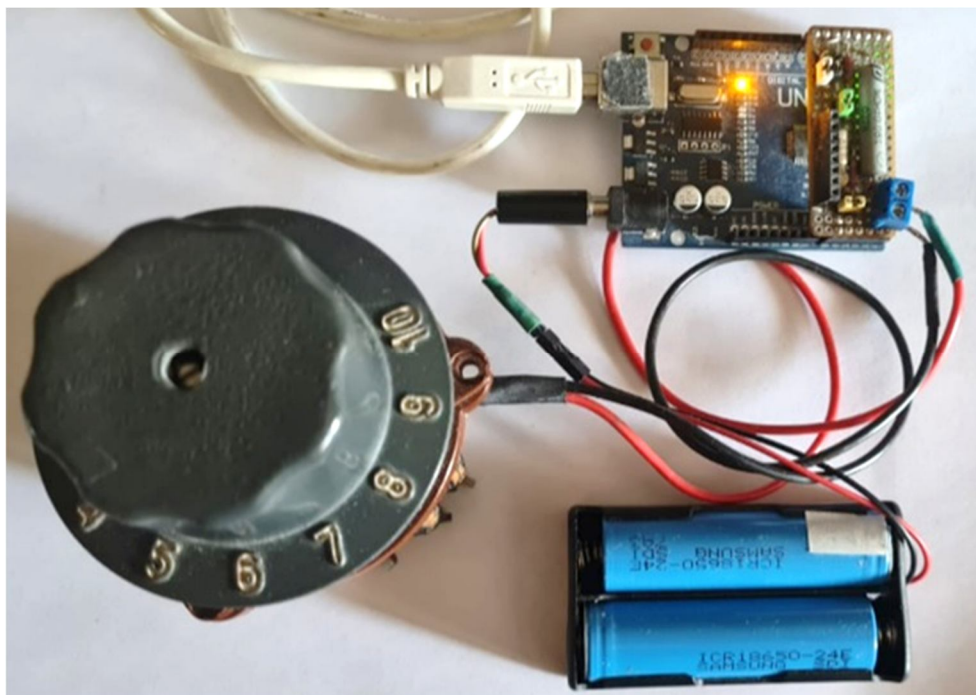


Рис. 3. Экспериментальный стенд

Fig. 3. Experimental stand

При этом суммарная величина сопротивления опорного резистора и РДТ должна выбираться таким образом, чтобы не превысить максимально допустимый выходной ток цифрового вывода (в цикле заряда конденсатора) и обеспечить минимальный перегрев РДТ током, что достигается выбором скважности импульсов питания. Наиболее распространёнными являются платиновые РДТ с сопротивлением от 10 до 1000 Ом, но применяются и даже -10 кОм. При испытании сенда сопротивления РДТ изменяется в четырёхкратном диапазоне, что при чувствительности около 40%/°C перекрывает диапазон -200 ... 660. При этом типичная верхняя граница платиновых термометров для промышленных применений не превышает 660 °C.

На выбор ёмкости конденсатора, шунтирующего РДТ, влияет частота дискретизации АЦП. Минимально достижимая погрешность вычислений сопротивления РДТ по выражению (2) определяется погрешностью численного интегрирования.

Сравнение методов численного интегрирования левых прямоугольников (нулевой порядок точности) и трапеций (первый порядок точности) показал, что при отношении постоянной времени к интервалу дискретизации более 100 обеспечивается относительная погрешность вычисления РДТ меньше 0.5% и 0.00083% соответственно, что предопределяет выбор метода трапеций. При этом погрешность численного интегрирования методом прямоугольников снижается пропорционально частоте дискретизации, а методом трапеций –

квадрату частоты дискретизации. Отсюда ёмкость конденсатора:

$$C \geq 100 \frac{\Delta t}{R_{TS}}.$$

Может потребоваться коррекция величины ёмкости в сторону увеличения при завышенном сопротивлении РДТ, что может привести к недозаряду конденсатора устройства выборки хранения. В сенде значение ёмкости конденсатора выбрано равным 6,8 мкФ (постоянная времени в 250 раз выше интервала дискретизации).

В рамках экспериментальных исследований предложенным методом при фиксированной оптимальной длительности интервала t_1 (100 отсчетов для R_{TS} равном 1 кОм) для четырех номинальных сопротивлений РДТ (1-4 кОм) по результатам 100 измерений определены следующие значения: максимальные (R_{MAX}), минимальные (R_{MIN}) и средние (R_{AVER}) значения, относительные погрешности отклонения измеренных средних значений от номинальных (δ_{AVER}) и диапазон погрешностей (d), демонстрирующий разброс результатов измерения относительно среднего значения (табл. 1). График, демонстрирующий относительный диапазон отклонений от среднего значения, рассчитанный как разность максимального и минимального значений по отношению к среднему, выраженный в %, представлен на рис. 4. Анализ полученных значений относительных погрешностей, характеризующих отклонение измеренных значений сопротивлений от номинальных в диапазоне 1-4 кОм, продемонстрировал необходимость применения корректирующей модели.

Для коррекции результатов измерения (R_{TS}) получена следующая линейная модель

$$R_{ADJ} = 1,0063 \cdot R_{TS} + 0,0061,$$

где R_{ADJ} – скорректированное значение сопротивления РДТ.

В табл. 1 представлены значения максимальных, средних и минимальных сопротивлений РДТ в диапазоне 1-4 кОм с шагом 1 кОм, вычисленные с использованием модели линейной адаптации, а также относительные погрешности.

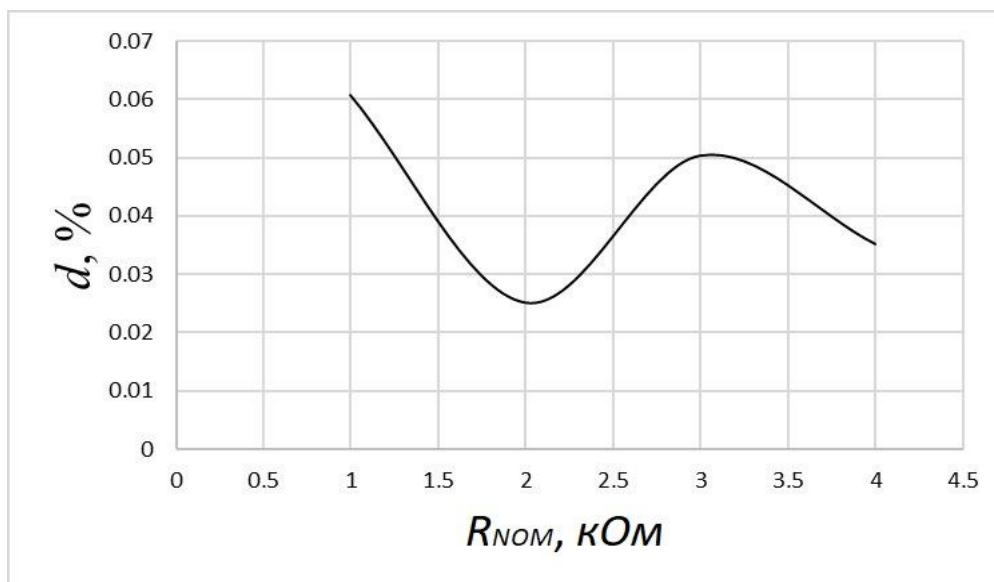


Рис. 4. Диапазон отклонения результатов измерения от среднего значения в зависимости от номинального значения сопротивления

Fig. 4. Range of deviation of measurement results from the average value depending on the nominal resistance value

Таблица 1. Результаты эксперимента и применения модели линейной адаптации

Table 1. Results of the experiment and application of the linear adaptation model

До применения линейной модели коррекции				
R_{NOM}	1	2	3	4
R_{MAX}	0,9876	1,9822	2,9759	3,9690
R_{AVER}	0,9872	1,9819	2,9753	3,9684
R_{MIN}	0,987	1,9817	2,9744	3,9676
$\delta_{AVER}, \%$	-1,28	-0,91	-0,79	-0,79
После применения линейной модели коррекции				
R_{MAX}	0,9999	2,0008	3,00075	4,0001
$\delta_{MAX}, \%$	-0,01	0,04	0,025	0,003
R_{AVER}	0,9995	2,0005	3,00014	3,9995
$\delta_{AVER}, \%$	-0,048	0,024	0,005	-0,013
R_{MIN}	0,9993	2,0003	2,99924	3,9987
$\delta_{MIN}, \%$	-0,068	0,015	-0,025	-0,033

На рис. 5 представлен график, демонстрирующий разброс относительных погрешностей измерения сопротивления после применения модели линейной адаптации.

Максимальный диапазон погрешностей отклонения результатов измерения от среднего составляет 0,06% (см. рис. 4), что свидетельствует о возможно-

сти применения результатов однократных измерений сопротивления РДТ. Оценка эффективности предложенного способа показала, что максимальная относительная погрешность измерения при использовании линейной модели коррекции не превышает 0,07%, что демонстрирует эффективность предложенного решения в сравнении с аналогами.

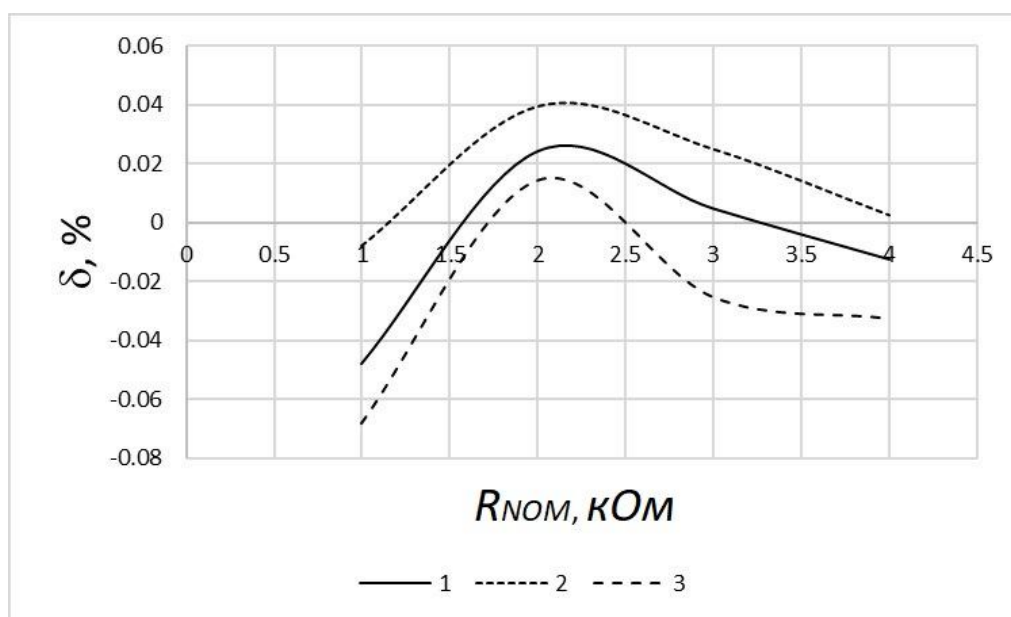


Рис. 5. Разброс относительных погрешностей измерения сопротивления РД на основе интегрирования начального участка переходного процесса при применении модели линейной адаптации: 1 – δ_{max} ; 2 – δ_{AVER} ; 3 – δ_{min}

Fig. 5. The spread of relative errors in measuring RD resistance based on the integration of the initial phase of the transition process when applying the linear adaptation model: 1 – δ_{max} ; 2 – δ_{AVER} ; 3 – δ_{min}

Так однократный способ непосредственного измерения обеспечивает относительную погрешность измерения на уровне 0,3% [17]. Относительная погрешность способа оценки сопротивления по результатам измерения напряжения переходного процесса разряда конденсатора на R_{TS} в двух точках составила 0,2% [18], а способа оценки по

результатам интегрирования на всём интервале переходного процесса с автоматической подстройкой параметров алгоритма измерения – в пределах 0,14% [19]. Предложенный способ измерения обеспечивает ускорение процедуры измерения в сравнении с представленным в [19] благодаря сокращению интервала интегрирования.

Выводы

Проведен аналитический обзор, посвященный способам снижения погрешностей измерения температуры резистивными датчиками при их удаленном размещении от измерительного блока. Определены основные направления совершенствования способов измерения температуры при двухпроводном подключении датчиков, как одного из наиболее перспективных технических решений, что обусловлено его простотой, надежностью и низкой стоимостью. Показано, что применение алгоритмов обработки на базе МК позволяет повысить точность измерений до уровня более сложных и дорогостоящих трех- и четырехпроводных схем.

Описан способ измерения сопротивления РДТ на основе обработки результатов интегрирования переходного процесса на начальном участке переходного процесса, преимуществами которого являются быстроедействие и повышение точности измерений. Приведено математическое описание и разработано программное обеспечение. Следует отметить, что интегрирование участка переходного процесса является средством подавления влияния шумов и помех, при этом повышение частоты дискретизации повышает эффективность подавления импульсных помех. Важным достоинством способа является нечувствительность к точности напряжения питания

цепи, точности поддержания ёмкости шунтирующего конденсатора, в том числе и к влиянию факторов внешней среды. Единственное требование к напряжению питания и ёмкости конденсатора – их стабильность в течение одного цикла измерения (в пределах 100 мс в условиях эксперимента).

Проведена апробация способа измерения на экспериментальном стенде, показавшая эффективность предложенного решения.

Проведен сравнительный анализ эффективности предложенного решения с одноточечным способом непосредственного измерения напряжения на РДТ, и оценками напряжения на основе измерения в двух точках переходного процесса и результатов интегрирования напряжения переходного процесса полного разряда конденсатора. Максимальная эффективность предложенного решения достигается в многоканальных сканирующих системах за счёт полного исключения аналоговых коммутаторов, особенно сложных при использовании 4-проводных схем подключения и двухкратного уменьшения суммарной длины проводников. При этом коммутация датчиков осуществляется цифровыми выводами МК, коммутирующими на общий провод возвратный проводники РДТ. Для разрыва цепи соответствующий цифровой вывод переводится в высокоимпедансное состояние [17].

Список литературы

1. Каспаров К. Н., Белозеров А. В. Измерение температуры быстропротекающих процессов // Измерительная техника. 2002. № 12. С. 34–38. <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>
2. Nagarajan P.R., George B., Kumar V.J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2017. № 66. P. 2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>.
3. Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А. Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 51–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-51-55>
4. Kabardin I.K., Pravdina M.K., Gordienko M.R., et al. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube // J. Engin. Thermophys. 2022. № 31. P. 309–314 <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>.
5. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters // Int J Thermophys. 2024. № 45. P. 22 <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>.
6. Kowal A., Manuszkiewicz H., Kołodziej B., et al. Tests of the Stability of Chinese RhFe Resistance Thermometers at Low Temperatures // Int J Thermophys. 2017. № 38. P. 38–95. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2232-8>
7. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers // Int J Thermophys. 2019. № 40. P. 1-7. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.
8. Ghaly S. M. A. LabVIEW Based Implementation of Resistive Temperature Detector Linearization Techniques // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2019. № 9. P. 4530–4533. <https://doi.org/10.48084/etasr.2894>.
9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence // Energies. 2021. Vol. 14, no. 24. P. 8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>.
10. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2022. № 71. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>.
11. Elangovan K. A Novel Triple-Slope-Based Digital Measurement Platform for Three-Wire Connected Resistive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. № 73. P. 1-3. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3411132>.
12. Tapan Kr. Maiti, Asim Kar. A new and low-cost lead resistance compensation technique for resistive sensors // Measurement. 2010. № 43. P. 735-738. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.01.013>.

13. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector / A. Rerkratn, S. Prombut, T. Kamsri, V. Riewruja, W. Petchmaneelumka // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 11. P. 4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>.
14. Reverter F. A Front-End Circuit for Two-Wire Connected Resistive Sensors with a Wire-Resistance Compensation // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 19. P. 8228. <https://doi.org/10.3390/s23198228>.
15. Jos' e A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances // *Measurement*. 2023. № 218. P. 113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>.
16. Li W., Xiong S., Zhou X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs) // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 9. P. 2742. <https://doi.org/10.3390/s2009274>
17. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2022. Т.65, № 4. С. 254–26. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>.
18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer // *Measurement Techniques*. 2022. № 65. P. 514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z>.
19. Bondar O. G., Brezhneva E.O., Zubarev A. Yu.. Improvement of algorithms for measuring temperature with two-wire connection of resistance thermometers // *Measurement Techniques*. 2023. Vol. 66, no. 4. P. 514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w>.
20. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2024. Т. 28, № 1. С. 71-87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>.
21. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А. Автоматическая подстройка параметров алгоритма измерения температуры в широком диапазоне // *Измерительная техника*. 2024. № 4. С. 46-53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-4-46-53>

References

1. Kasparov K.N., Belozarov A.V. Measurement of the Temperature of High-Speed Processes. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*. 2002; 45: 1256–1263. (In Russ.). <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>
2. Nagarajan P.R., George B., Kumar V.J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2017; 66:2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>.
3. Filatov A. V., Serdyukov K. A., Novikova A. A. Prospects of Using a Modified Null Method for Temperature Measurement with Resistance Sensors. *Izmeritel'naya tekhnika =*

Measurement Techniques. 2017; 63(7):567–572 (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x>.

4. Kabardin I.K., Pravdina M.K., Gordienko M.R., et al. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube. *J. Engin. Thermophys.* 2022; 31: 309–314. <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>.

5. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters. *Int J Thermophys.* 2024; 45: 22. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>.

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

7. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers. *Int J Thermophys.* 2019; 40:1-7. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.

8. Ghaly S. M. A. LabVIEW Based Implementation of Resistive Temperature Detector Linearization Techniques. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2019; 9:4530–4533. <https://doi.org/10.48084/etasr.2894>.

9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence. *Energies*. 2021; 14(24):8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>.

10. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022; 71: 1-4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>.

11. Elangovan K. A Novel Triple-Slope-Based Digital Measurement Platform for Three-Wire Connected Resistive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024; 73: 1-3. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3411132>.

12. Tapan Kr. Maiti, Asim Kar. A new and low-cost lead resistance compensation technique for resistive sensors. *Measurement*. 2010; 43: 735-738. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.01.013>.

13. Rerkratn A., Prombut S., Kamsri T., Riewruja V., Petchmaneelumka W. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector. *Sensors*. 2022; 22(11):4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>.

14. Reverter F. A Front-End Circuit for Two-Wire Connected Resistive Sensors with a Wire-Resistance Compensation. *Sensors*. 2023; 23(19):8228. <https://doi.org/10.3390/s23198228>

15. Jos' e A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances. *Measurement*. 2023; 218: 113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>.

16. Li W., Xiong S., Zhou X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs). *Sensors*. 2020; 9: 2742. <https://doi.org/10.3390/s20092742>.

17. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P. S. Multi-channel temperature converter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2022; 65 (4): 254-261. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>.
18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer. *Measurement Techniques*. 2022; 65:514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z>.
19. Bondar O. G., Brezhneva E.O., Zubarev A. Yu.. Improvement of algorithms for measuring temperature with two-wire connection of resistance thermometers. *Measurement Techniques*. 2023; 66 (4): 514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w>.
20. Bondar O. G., Brezhnev E. O., Botikov K. A. Research of the Method For Measuring Temperature with a Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 71-87 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>
21. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Botikov K.A. Automatic adjustment of the parameters of the temperature measurement algorithm in a wide range. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*. 2024;(4):46-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-4-46-53>.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

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

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

Калмыков Андрей Игоревич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: q56fyjim@mail.ru

Andrey I. Kalmykov, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: q56fyjim@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.02

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172>

Методика анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем

Г. В. Петушков ¹ ✉

¹ Российский технологический университет «РТУ МИРЭА»,
пр. Вернадского, д. 78, Москва 119454, Российская Федерация

✉ e-mail: petushkov@mirea.ru

Резюме

Целью работы. Методика и анализ моделей надежности системы, включающих мониторинг состояния отдельных компонентов и оценку отказов на основе интенсивности отказов и вероятности безотказной работы модулей. Работа направлена на создание эффективных методов прогнозирования отказов и оценки времени восстановления системы, учитывая параметры отказов отдельных модулей и их взаимодействие. Также в рамках работы предполагается моделирование мониторинга состояния и функционирования системы.

Методы. Методы исследования включают анализ надежности системы с использованием интенсивностей отказов, моделирование вероятности безотказной работы компонентов системы, вычисление среднего времени до отказа, использование вероятностных распределений для определения состояния системы, мониторинг состояния системы в реальном времени, оценку времени восстановления системы, а также разработку алгоритмов для обнаружения отказов и управления восстановлением работы системы, методы моделирования

Результаты. Результаты исследования показывают, что с увеличением времени работы системы вероятность безотказной работы каждого компонента снижается из-за накопления отказов. Моделирование показало, что надежность системы зависит от интенсивности отказов каждого модуля и их взаимосвязи в системе. Для трех разных систем с различными интенсивностями отказов были проведены расчеты изменения вероятности безотказной работы ($R(t)$) в зависимости от времени. Анализ показал, что с увеличением времени работы вероятность отказа системы возрастает, что подтверждается уменьшением значения $R(t)$ по мере увеличения времени t . При моделировании восстановления системы было установлено, что время восстановления зависит от количества отказавших модулей и интенсивностей их отказов. Система мониторинга успешно реагирует на изменения в реальном времени, выявляя значимые события, такие как отказ модулей, и оценивая время восстановления системы с учетом текущих данных о состоянии компонентов.

Заключение. В ходе проведенного исследования был разработан и реализован метод моделирования надежности системы на основе анализа интенсивностей отказов ее компонентов и вероятности безотказной работы ($R(t)$). Рассмотренные методы позволили вычислить среднее время до отказа системы, а также оценить время восстановления системы после отказа, что является ключевым фактором для обеспечения бесперебойной работы критически важных систем. Была продемонстрирована эффективность системы мониторинга, которая на основе данных о состоянии компонентов ($M(t)$) может оперативно выявлять отказные события и прогнозировать время восстановления, что позволяет оперативно принимать меры по восстановлению работоспособности системы.

Ключевые слова: надежность системы; интенсивность отказов; вероятность безотказной работы; время до отказа; система мониторинга; восстановление системы; моделирование надежности; отказные события; управление надежностью; прогнозирование отказов.

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

Для цитирования: Петушков Г. В. Методика анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 155-172. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172>.

Поступила в редакцию 27.12.2024

Подписана в печать 03.02.2025

Опубликована 14.04.2025

Methodology of reliability analysis and monitoring of aircraft operation

Grigory V. Petushkov ¹ ✉

¹ MIREA – Russian Technological University
78, Vernadskogo str., Moscow 119454, Russian Federation

✉ e-mail: petushkov@mirea.ru

Abstract

Purpose of research. Methodology and analysis of system reliability models, including monitoring the condition of individual components and failure assessment based on the failure rate and the probability of failure-free operation of modules. The work is aimed at creating effective methods for predicting failures and estimating system recovery time, taking into account the failure parameters of individual modules and their interaction. The work also involves modeling the monitoring of the state and functioning of the system.

Methods. Research methods include analyzing system reliability using failure rates, modeling the probability of uptime of system components, calculating the average time to failure, using probability distributions to determine system status, monitoring system status in real time, estimating system recovery time, as well as developing algorithms for detecting failures and managing system recovery, modeling methods.

Results. The results of the study show that as the system's operating time increases, the probability of uptime for each component decreases due to the accumulation of failures. The simulation showed that the reliability of the system depends on the failure rate of each module and their relationship in the system. For three different systems with different failure rates, the change in the probability of uptime ($R(t)$) was calculated as a function of time. The analysis showed that as the operating time increases, the probability of system failure increases, which is confirmed by a decrease in the value of $R(t)$ as the time t increases. When modeling system recovery, it was found that the recovery time depends on the number of failed modules and the intensity of their failures. The monitoring system successfully reacts to changes in real time, identifying significant events such as module failure, and estimating system recovery time based on current component status data.

Conclusion. In the course of the research, a method for modeling system reliability based on an analysis of the failure rates of its components and the probability of uptime ($R(t)$) was developed and implemented. The methods considered made it possible to calculate the average time to system failure, as well as to estimate the system recovery time after failure, which is a key factor in ensuring the smooth operation of critical systems. The effectiveness of the monitoring system has been demonstrated, which, based on data on the state of components ($M(t)$), can quickly identify failure events and predict recovery time, which allows for prompt measures to restore system operability.

Keywords: *system reliability; failure rate; probability of uptime; time to failure; monitoring system; system recovery; reliability modeling; failure events; reliability management; failure prediction.*

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

For citation: Petushkov G. V. Methodology of reliability analysis and monitoring of aircraft operation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 155-172 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172>.

Received 27.12.2024

Accepted 03.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

Надежность вычислительных систем (далее ВС) представляет собой комплексное свойство, которое, в зависимости от целей и условий эксплуатации системы, может включать такие характеристики, как безотказность, долговечность, ремонтно-пригодность и работоспособность, а также их различные комбинации. Любой элемент ВС можно рассматривать как самостоятельную систему, как правило, более низкого порядка. Каждый элемент системы описывается своей функцией [1]. В данной статье под надежностью понимается безотказность, что означает способность системы поддерживать работоспособность в течение заранее установленного времени.

С развитием современных аппаратных средств, которые обеспечивают высокую производительность как по времени выполнения операций, так и по объему памяти, на фоне усиливающейся конкуренции между разработчиками систем, акцент смещается с производительности на обеспечение надежности.

Процесс расчета надежности вычислительных систем позволяет не только провести сравнительный анализ различных вариантов структурной организации системы, но и обосновать выбор наиболее эффективного решения, а также проверить соответствие характеристик надежности требованиям технического задания. Тем не менее, оценка надежности вычислительных систем остается трудоемким процессом, а программные средства для построения моделей надежности и расчета этих характеристик пока недостаточно развиты. Это подчеркивает актуальность разработки методик и программных средств для оценки надежности вычислительных систем. Периодическая потребность в реконфигурации таких систем актуализирует следующие вопросы: – выбор и разработка методов реконфигурации с акцентом на минимизацию времени выполнения процедуры, что связано с необходимостью обработки данных в реальном времени в синергетике [2]; – выбор и разработка методов формирования сообществ вычислительных устройств с оптимизацией по заданной целевой функции.

Материалы и методы

Для реализации сетевых ВС, которые служат основой функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем с переменной (реконфигурируемой) структурой, можно использовать различные модификации сетей взаимодействующих автоматов, сетей Петри и других исполнимых сетевых моделей.

Такая сеть является одной из наиболее известных и широко применяемых моделей для описания распределенных и параллельных систем. Она представляет собой ориентированный двудольный граф, где вершины делятся на переходы и позиции. Позиции в сети обозначают условия и могут содержать метки, а дуги в графе указывают на постусловия, связанные с переходами, которые представляют события, происходящие в сети [3-4].

Оценка соответствия показателей надежности вычислительных систем заданным требованиям может быть проведена с использованием одного из трех методов: вычислений, испытаний и комбинирования:

1. Метод вычислений: используется на стадии проектирования для оценки того, насколько выбранная архитектура системы может выполнить требования по надежности. Он основывается на представлении системы в виде схемы, которая позволяет рассчитать показатели надежности по характеристикам ее элементов.

2. Метод испытаний: включает в себя сбор данных, получаемых в процессе проведения как отдельных, так и

комплексных тестов, направленных на проверку функциональности аппаратных и программных компонентов системы.

3. Комбинированный метод: сочетает в себе данные из испытаний отдельных частей системы с расчетами по модели, которая учитывает всю структуру системы для оценки ее надежности.

Для оценки наилучшим образом подходят расчетные методы, основанные на моделях динамики надежности [5-6]. Основными подходами к моделированию надежности являются:

– Модель причинно-следственных связей (МПС) – используется для оценки вероятности отказов и анализирует последовательность событий, ведущих к сбою.

– Граф надежности (ГН) – визуализирует все возможные пути для обеспечения успешного функционирования системы.

– Схема надежности (СН) – представляет элементы системы и их взаимодействия, на основе которых рассчитываются показатели надежности.

Модель причинно-следственных связей предпочтительна для диагностики и идентификации неисправностей систем реального времени [7]. Тем не менее, при применении такой модели для расчета надежности системы возникает потребность в более сложной декомпозиции, если отказ компонентов не является независимым, что может усложнить использование иерархических моделей с резервированием [8].

Чем интенсивнее проводится эксплуатация системы, тем интенсивнее выявляются ошибки, быстрее растет надежность системы и соответственно ее качество. Вычислительные системы управления производственными процессами, компоненты которых обычно включают аппаратно-программные комплексы, представляющие собой индустриальные контроллеры (ИК) с соответствующим программным обеспечением. Такие системы могут относиться к одному из двух типов: резервные контроллеры и стандартные контроллеры для автоматизации.

Для повышения надежности, контроллеры часто работают в режиме резервирования, а стандартные контроллеры при отказе восстанавливаются с помощью запасных частей и комплектующих.

Учитывая временный характер объединения вычислительных узлов в систему обработки данных, становится очевидно, что структура будет произвольной, и однозначное разбиение ее на параллельно-последовательные участки вряд ли представляется возможным. Формирование архитектуры таких вычислительных систем обработки актуализирует вопрос о том, какая архитектура будет считаться предпочтительной [9].

При реализации сетевых модулей, как основы реализации функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем с переменной (реконфигурируемой) структурой, возможно использовать различные модификации сетей взаимодействующих автома-

тов, сетей Петри и других исполнимых сетевых моделей [10].

Для высоконадежных систем, доступ к контроллеру и замена его элементов обслуживающим персоналом считаются невозможными, и можно выделить следующие основные компоненты контроллера, которые могут быть заменены при их отказе. Качество таких решений зависит от времени перераспределения рабочей нагрузки [11]:

- процессорный блок (Центральный процессор, графические и вычислительные ускорители);
- устройства ввода сигналов (датчики температуры, давления и т.д.);
- устройства ввода сигналов (датчики температуры, давления, сенсоры для мониторинга состояния оборудования);
- системы хранения данных (жесткие диски, твердотельные накопители, RAID-массивы);
- элементы охлаждения (вентиляторы, тепловые мосты, системы жидкостного охлаждения).

Механизм реконфигурации вычислительной системы [12] позволяет выполнять динамическую реконфигурацию с минимальными задержками, объединяя проверенные технологии, такие как много контекстная и частичная реконфигурация, с новыми подходами, включая сопоставление тегов и профили реконфигурации, в единую методику [13].

Ключевым преимуществом данного механизма является высокая масштабируемость и гибкость, что позволяет адаптировать его к различным аппаратным

платформам, обеспечивая эффективное использование в любой реконфигурируемой вычислительной среде. В отличие от традиционных методов, этот механизм поддерживает работу даже в условиях высокой гетерогенности архитектур, включая пользовательские реконфигурируемые системы, что делает его универсальным решением для широкого спектра вычислительных задач.

Компоненты ВС обладают своими показателями надежности, чаще всего выражаемыми через интенсивность отказов λ , которая для периода нормальной эксплуатации считается постоянной. Распределение отказов контроллера представляет собой простой пуассоновский поток, где интенсивность отказов каждого компонента λ и среднее время до его отказа T связаны соотношением $T=1/\lambda$. Интенсивность отказов контроллера Λ равна сумме интенсивностей отказов всех n компонентов, так как отказ каждого компонента приводит к отказу всей системы.

Расчет общей интенсивности отказов системы, состоящей из нескольких компонентов, выглядит следующим образом:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \quad (1)$$

где Λ – общая интенсивность отказов всей системы;

n – количество компонентов в системе;

T_i – среднее время до отказа i -го компонента.

Рассчитав общую интенсивность отказов системы, учитывая, что для каждого компонента имеется свое среднее время до отказа T_i . Каждый компонент системы может иметь свое собственное значение времени работы до отказа, и интенсивность его отказа связана с этим временем обратной зависимостью. Чем меньше среднее время до отказа компонента, тем выше его интенсивность отказов, меньше системное обеспечение решений векторного критерия эффективности [14].

Для системы с n компонентами, общая интенсивность отказов Λ является суммой величин, которые обратно пропорциональны средним временам до отказа каждого из компонентов. Для оценки безотказности системы следует использовать обобщенный критерий сложных систем [15-16], который может показать основную надежность.

Безотказная вероятность работы системы $R(t)$ для независимых отказов всех компонентов может быть выражена как:

$$R(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t}, \quad (2)$$

где λ_i – интенсивность отказа i -го компонента; n – количество компонентов в системе.

Среднее время до отказа системы $T_{\text{среднее}}$ может быть получено как интеграл от функции надежности $R(t)$:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} dt. \quad (3)$$

Решение этого интеграла дает среднее время до отказа системы:

$$T_{\text{среднее}} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}. \quad (4)$$

Общая вероятность безотказной работы системы и среднее время до отказа для системы с независимыми отказами всех компонентов могут быть выражены через суммы интенсивностей отказов λ_i всех компонентов в расчете на сложность информационных конструкций [17].

При возникновении неопределенной информационной ситуации и комплементарности [18, 19], для ВС с функциональными единицами системы, соединенными смешанным способом, для нормального функционирования требуется, чтобы не менее k из n элементов работали без отказа. Если блоки системы имеют одинаковые вероятности безотказной работы и независимость отказов, вероятность безотказной работы системы $R(t)$ и среднее время безотказной работы могут быть выражены одной объединенной формулой:

$$R(t) = \binom{n}{k} e^{-\lambda t k} (1 - e^{-\lambda t})^{n-k}, \quad (5)$$

где $p(t) = e^{-\lambda t}$ – вероятность безотказной работы блока на интервале времени $[0, t]$; $\binom{n}{k}$ — количество способов выбрать k блоков из n , а λ — интенсивность отказов каждого блока.

Среднее время безотказной работы системы T рассчитывается как интеграл:

$$T = \int_0^{\infty} \binom{n}{k} e^{-\lambda t k} (1 - e^{-\lambda t})^{n-k} dt. \quad (6)$$

Если блоки системы имеют различные интенсивности отказов, расчет надежности и среднего времени работы становится более сложным, требуя учета всех возможных успешных комбинаций блоков.

Структурная схема надежности с узлами и связями [19] представляет собой иерархическую модель, включающую как простые, так и составные элементы. Простые элементы (ПЭ) являются неделимыми и характеризуются определенной интенсивностью отказов. Составные элементы (СЭ) состоят из нескольких связанных между собой простых или составных элементов, при этом соединения между ними могут быть последовательными, параллельными или смешанными. При расчете надежности необходимо учитывать тип этих соединений.

Методика расчета надежности структурной схемы с использованием функций надежности (вероятности безотказной работы) компонентов:

1. Начинаем с верхнего уровня иерархии и проверяем тип текущего компонента: простой или составной. Если элемент простой, переходим к следующему шагу, если составной – продолжаем по схеме.

2. Для составного элемента проверяются компоненты, его образующие:

– если все компоненты простые, рассчитываем вероятность безотказной работы для этого составного элемента с учетом типа их соединения, затем переходим к следующему шагу;

– если один из компонентов составной, продолжаем анализировать на более низком уровне иерархии.

3. Заменяем составной элемент на простой элемент с расчетной функцией надежности.

4. Возвращаемся на более высокий уровень иерархии и повторяем шаги 2-3, если не достигнут самый верхний уровень.

5. Когда достигаем верхнего уровня, переходим к расчету функции надежности всей системы.

6. Если рассмотрены все компоненты верхнего уровня, переходим к следующему шагу.

7. На основе полученной функции надежности рассчитываем среднее время до отказа системы.

Этот процесс позволяет моделировать надежность сложных систем, включая анализ и вычисление ключевых показателей для каждого компонента и всей системы в целом.

Для анализа работы вычислительной системы можно построить систему дифференциальных уравнений, которые определяют ключевые характеристики ее надежности. Эти уравнения предназначены для вычисления вероятности нахождения системы в определенном состоянии в момент времени t . Вначале для расчета времени безотказной работы $p(t)$ строится граф состояний системы, на котором отмечаются все отказные состояния, из которых невозможно перейти в соседние исправные состояния. Затем, на основе графа состояний

формулируется система дифференциальных уравнений.

Дифференциальные уравнения, описывающие количественные характеристики надежности, готовности и ремонтпригодности вычислительной системы, необходимо определить вероятности пребывания системы в различных состояниях на основе графа состояний. Для этого нужно сформулировать правило составления уравнений для вероятности пребывания системы в i -м состоянии в момент времени t . Дифференциальное уравнение для вероятности $P_i(t)$ пребывания системы в i -м состоянии будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\lambda_i P_i(t) + \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} P_j(t), \quad (7)$$

где $P_i(t)$ – вероятность нахождения системы в i -м состоянии в момент времени t ; λ_i – интенсивность перехода из состояния i в отказное состояние (или в другое состояние, где система уже отказала); λ_{ji} – интенсивность перехода из состояния j в состояние i ; $\sum_{j \neq i} \lambda_{ji} P_j(t)$ – сумма переходных потоков из других состояний j в состояние i .

Данная система уравнений позволяет вычислить вероятности нахождения вычислительной системы в каждом состоянии для разных типов состояний (рабочее, отказное, ремонтируемое и т. д.), что, в свою очередь, дает возможность рассчитать характеристики надежности, готовности и ремонтпригодности системы.

Для оценки надежности вычислительной системы, состоящей из мно-

гофункциональных модулей, важно учитывать не только распределение функциональных модулей по узлам системы, но и то, как отказ каждого модуля влияет на выполнение различных функций. Методика для расчета вероятности того, что хотя бы одна функция из множества d функций может быть выполнена в одном из m многофункциональных модулей.

Матрица размещения функциональных модулей системы сопоставляется функциональный модуль, который либо исправен, либо отсутствует. Матрица размещения функциональных модулей по узлам системы $\{\varphi_{ij}\}$ имеет размерность $n \times m$, где n – количество типов функциональных модулей, а m – количество узлов. Элемент $\varphi_{ij}=1$ означает, что в j -м узле размещен исправный функциональный модуль i -го типа, в противном случае $\varphi_{ij}=0$.

Время безотказной работы системы зависит от времени безотказной работы функциональных модулей, и оценка этой зависимости требует учета специфики размещения модулей по узлам системы. Для этого используется комбинаторно-вероятностный метод включения-исключения, который позволяет учитывать взаимосвязи между функциями и модулями, а также оценивать время безотказной работы системы.

Вероятность выполнения хотя бы одной функции, когда система состоит из m многофункциональных модулей, каждый из которых может выполнять одну или несколько функций из множе-

ства d функций $\{f_1, f_2, \dots, f_d\}$. Вероятность того, что хотя бы одна функция будет выполнена в j -м модуле, можно выразить как:

$$P_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^d (1 - P_{ij}(t)), \quad (8)$$

где: $P_{ij}(t)$ – вероятность того, что функциональный модуль i -го типа в узле j будет работать без отказа в момент времени t ;

$P_j(t)$ – вероятность того, что хотя бы одна функция будет выполнена в j -м модуле.

Метод включения-исключения

Для более точных расчетов, в зависимости от взаимозависимости выполнения функций и отказов модулей, применяется метод включения-исключения. Этот метод позволяет учитывать все возможные пересечения между функциями, что дает более точные оценки надежности.

Оценка времени безотказной работы системы может быть получена с помощью комбинирования вероятностей выполнения функций в каждом модуле с учетом взаимных отказов.

В случае сложности вычислений с полным методом включения-исключения, можно использовать приближенные методы, которые будут давать оценки с заданной погрешностью, но значительно упрощают расчет, сохраняя приемлемую точность для практических применений.

Система мониторинга играет важную роль в поддержании надежности и эффективности работы вычислительных

систем. Основные задачи, которые решает такая система, включают:

Получение и сохранение значений $M(t)$: Система мониторинга должна получать данные о состоянии вычислительной системы на каждом этапе времени. Эти данные могут включать информацию о текущих значениях различных показателей, таких как загрузка процессора, состояние памяти, количество отказов, интенсивности отказов компонентов и другие параметры, влияющие на функционирование системы. Значения $M(t)$ представляют собой набор измеряемых характеристик, которые могут изменяться во времени в зависимости от работы системы. Эти значения должны быть зафиксированы и сохранены для дальнейшего анализа и принятия решений.

После получения данных система мониторинга должна анализировать информацию для выявления значимых событий. Это может включать обнаружение отклонений от нормальной работы системы, таких как превышение пороговых значений параметров, возникновение отказов или снижение производительности. Система мониторинга должна иметь возможность эффективно выделять такие события, которые могут оказать существенное влияние на работу системы, аварийные ситуации или близкие к отказу компоненты. Выявление таких событий является основой для принятия оперативных решений.

На основании обнаруженных значимых событий система мониторинга

должна инициировать соответствующие меры реагирования. Это может включать в себя автоматический запуск процессов восстановления, уведомление оператора о возникшей проблеме, активацию дополнительных резервных ресурсов или выполнение других действий, направленных на минимизацию воздействия сбоя на систему. Механизмы отклика должны быть настроены таким образом, чтобы эффективно устранять последствия сбоев или отклонений и восстанавливать нормальную работу системы в кратчайшие сроки.

Задачи системы мониторинга интегрируются в общую систему управления надежностью, которая позволяет не только отслеживать состояние вычислительных систем, но и принимать своевременные меры для минимизации рисков отказов и повышения устойчивости системы.

Результаты и их обсуждение

Рассчитанные значения для трех систем подтверждают, что с увеличением общего числа компонентов и интенсивности их отказов вероятность безотказной работы на заданном временном интервале существенно снижается. Предположим, что для ВС №1 с общей интенсивностью отказов $\Lambda=0,035$, вероятность безотказной работы через 1 час составляет 0,9656, а через 10 часов снижается до 0,7047. В ВС №2, где интенсивность отказов выше ($\Lambda=0,06$), вероятность безотказной работы через 10 часов падает до 0,5488. Для ВС №3 с $\Lambda=0,05$,

вероятности безотказной работы через 1 и 10 часов составляют соответственно 0,9512 и 0,3679.

Среднее время до отказа зависит от интенсивности отказов компонентов: для первой оно составляет 28,57 часов, для

второй – 16,67 часов, а для третьей – 20,0 часов.

Чем меньше среднее время до отказа, тем быстрее система выходит из строя, что также отражает зависимость между интенсивностью отказов и временем работы системы что показано на табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов для трех различных систем с учетом временных интервалов и вероятности безотказной работы

Table 1. Calculation results for three different systems considering time intervals and probability of failure

Параметр / Parameter	Система 1 / System 1	Система 2 / System 2	Система 3 / System 3
Интенсивности отказов компонентов (λ_i)	$\lambda_1=0,01$, $\lambda_2=0,02$, $\lambda_3=0,005$	$\lambda_1=0,01$, $\lambda_2=0,005$, $\lambda_3=0,02$, $\lambda_4=0,015$, $\lambda_4=0,01$	$\lambda_1=0,01$, $\lambda_2=0,02$, $\lambda_3=0,015$, $\lambda_4=0,005$
Общая интенсивность отказов (Λ)	$\Lambda=0.035$	$\Lambda=0.06$	$\Lambda=0.05$
Среднее время до отказа (СВДО), ч	$T_{\text{среднее}}=28.57$	$T_{\text{среднее}}=16.67$	$T_{\text{среднее}}=20.0$
Время (t), ч	1	1	1
Вероятность безотказной работы $R(t)$	$R(1)\approx 0.9656$	$R(1)\approx 0.9418$	$R(1)\approx 0.9512$
Время (t), ч	5	5	5
Вероятность безотказной работы $R(t)$	$R(5)\approx 0.8395$	$R(5)\approx 0.7408$	$R(5)\approx 0.7788$
Время (t), ч	10	10	10
Вероятность безотказной работы $R(t)$	$R(10)\approx 0.7047$	$R(10)\approx 0.5488$	$R(20)\approx 0.3679$

Данные результаты могут быть использованы для оптимизации надежности распределенных систем, выбора подходящих компонентов и планирования

обслуживания оборудования в зависимости от требуемых уровней надежности. С увеличением общей интенсивности отказов системы, вероятность ее безот-

казной работы на заданном интервале времени значительно уменьшается. Это объясняется тем, что при большем числе компонентов или высокой интенсивности отказов отдельных компонентов система быстрее выходит из строя.

Среднее время до отказа T "среднее" также связано с суммарной интенсивностью отказов и напрямую влияет на надежность системы. Для корректного планирования эксплуатации распределенных вычислительных систем важно учитывать как индивидуальные интенсивности отка-

зов компонентов, так и их взаимодействие в общей системе.

Рис. 1 иллюстрирует изменения вероятности безотказной работы $R(t)$ для трех различных систем в зависимости от времени t . Ось x на графике отображает время, выраженное в часах, в то время как ось y показывает величину надежности $R(t)$, которая представляет собой вероятность того, что система будет функционировать без отказа в течение указанного времени.

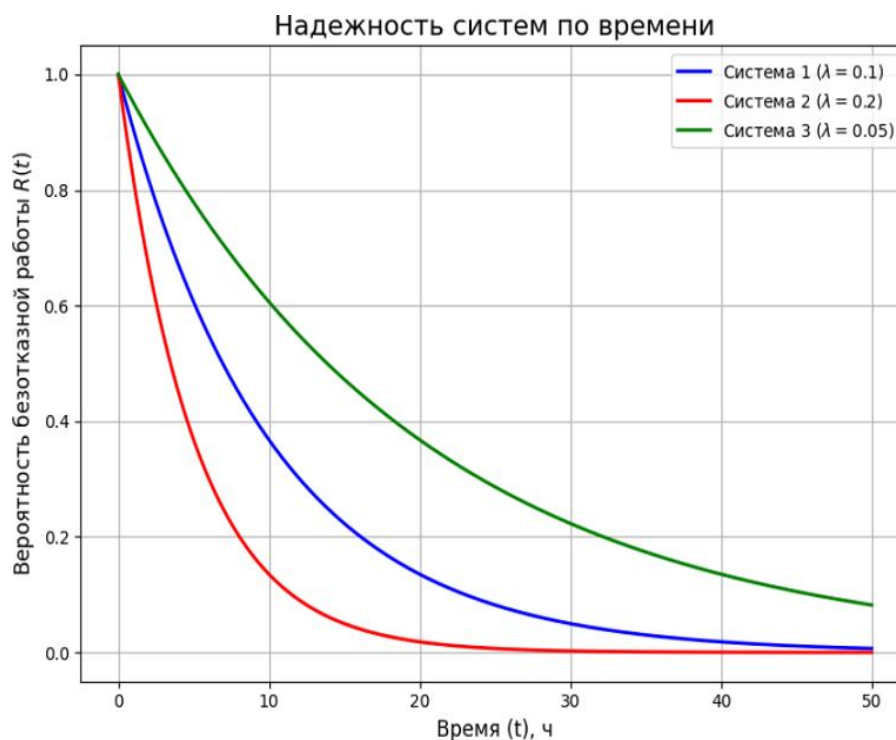


Рис 1. Надежность каждой системы меняется с течением времени в зависимости от их интенсивности отказов

Fig. 1. The reliability of each system varies over time depending on their failure rate

Для каждой системы на графике представлена отдельная линия, показывающая, как ее надежность изменяется с течением времени. Зависимость надежности от времени: вероятность безотказной работы $R(t)$ зависит от интенсивно-

сти отказов каждого компонента системы. С течением времени эта вероятность уменьшается, так как элементы системы подвергаются износу или сбоям, что приводит к увеличению риска их отказа. Чем выше интенсивность от-

казов системы (то есть, чем выше значение λ_i для ее компонентов), тем быстрее система теряет свою надежность. Кривые на графике могут иметь разные наклоны в зависимости от значений интенсивности отказов для каждой из систем. Система с более высокими значени-

ями интенсивности отказов будет иметь более крутое снижение надежности.

Проведем расчет трех реальных систем на надежность на базе - процессоров Intel Xeon, AMD EPYC и Baikal-S с разными характеристиками (табл. 2).

Таблица 2. Конфигурации вычислительных систем

Table 2. Configurations of computing systems

Название ВС / SUN Name	Система 1: Intel Xeon / System 1: Intel Xeon	Система 2: AMD EPYC / System 2: AMD EPIC	Система 3: Baikal-S / System 3: Baikal-S
ЦП (CPU)	2 × Intel Xeon Gold (без резервирования)	2 × AMD EPYC (без резервирования)	4 × Baikal-S (без резервирования)
ОЗУ (RAM)	4 модуля DDR5 (отказывает при выходе 2 и более модулей)	8 модулей DDR4 (отказывает при выходе 3 и более модулей)	6 модулей DDR4 (отказывает при выходе 3 и более модулей)
Жесткие диски	4 SSD NVMe (RAID 0, отказывает при выходе 1 и более дисков)	2 HDD (RAID 1, отказывает при выходе 1 и более дисков)	3 HDD (RAID 5, отказывает при выходе 2 и более дисков)
Блоки питания	1	1	2
Сетевые адаптеры	2	2	1

Интенсивность отказов (λ) вычисляется на основе открытых данных о средней наработке на отказ (MTTF/MTBF), полученных из отраслевых стандартов надежности (Telcordia SR-332, MIL-HDBK-217, IEC 62380), статистики отказов серверных систем (данные из крупных ЦОДов), а также технической документации производителей оборудования.

Данные значения могут изменяться в зависимости от условий эксплуатации, температурного режима, качества электропитания и рабочих нагрузок.

Для расчета вероятностей отказов компонентов в данных системах, используя методы вероятностного моделирования (1)-(6), получаем следующие значения (табл. 3).

Таблица 3. Результат тестирования на отказоустойчивость вычислительных систем**Table 3.** Result of fault tolerance testing of computing systems

Компонент / Component	Intel Xeon (RAID 0, DDR5)	AMD EPYC (RAID 1, DDR4)	Baikal-S (RAID 5, DDR4)
CPU	0.9995	0.9994	0.9993
RAM	0.78	0.61	0.69
Жесткие диски	0.9992 (SSD)	0.999 (HDD)	0.998 (HDD)
PSU	0.9992	0.9992	0.9992
NIC	0.9997	0.9997	0.9997
Общая вероятность	0.777	0.608	0.688

По итогам тестирования можно сделать следующие выводы: система Intel Xeon (RAID 0, DDR5) демонстрирует лидирующую надежность – 77,7%, но использование RAID 0 увеличивает риск потери данных, Baikal-S (RAID 5, DDR4) обеспечивает надежность 68,8%, что делает ее более устойчивой к отказам, чем AMD EPYC с RAID 1 60,8%. Это преимущество Baikal-S связано с использованием RAID 5. BC AMD EPYC (RAID 1, DDR4) имеет наименьшую надежность из-за высокой вероятности отказа оперативной памяти, особенно если в системе установлено 8 модулей. При выборе между этими конфигурациями стоит учитывать, что если основной приоритет – высокая производительность и допустим риск потери данных, то лучше выбрать Intel Xeon. Если же необходим баланс между надежностью и производительностью, то оптимальным вариантом станет Baikal-S. В случае, когда

главную роль играет сбор и резервирование данных, предпочтительнее будет система AMD EPYC с RAID 1.

Описанная методика относится к методу включения-исключения в анализе надежности вычислительных систем. Метод используется для расчета вероятности безотказной работы системы, состоящей из нескольких компонентов, принимая во внимание вероятность их отказов и возможные комбинации работоспособных элементов. К ключевым особенностям данной методики можно отнести: поддержка масштабируемости и гибкости в различных аппаратных средах; учет отказов компонентов через интенсивности отказов λ_i и среднее время до отказа T_i ; использование распределения отказов по пуассоновскому закону; оценка вероятности безотказной работы системы $R(t)$ на основе суммарной интенсивности отказов; математическое описание системы с учетом

переходов между состояниями и вероятностей их нахождения в каждом состоянии; учет многофункциональности модулей и вероятности выполнения хотя бы одной функции системой. Данный метод может применяться в анализе надежности сложных систем, особенно, когда система состоит из функционально дублированных или резервируемых модулей с разными вероятностями отказа. К минусам метода можно отнести: высокую вычислительную сложность при увеличении числа компонентов, сложность вычислений возрастает экспоненциально; сложность реализации требует точного учета зависимостей между отказами элементов системы; не всегда эффективен для больших систем при большом количестве элементов; не учитывает динамическое поведение системы; анализ производится на основе статистических вероятностей отказов.

При сравнении с другими методами: метод Монте-Карло, который более удобен для анализа сложных и нелинейных систем, но требует значительных вычислительных ресурсов и многократных симуляций; Марковские модели, хорошо подходят для систем с восстанавливаемыми компонентами и возможностью переходов между состояниями; метод блочного анализа (Fault Tree Analysis, FTA) удобен для визуализации отказов и их причин, но плохо масштабируется при сложных зависимостях между компонентами; аналитические методы на основе уравнений надежности позволяют получать точные решения для

некоторых классов систем, но часто требуют упрощения модели.

Метод включения-исключения наиболее полезен для систем со сложными зависимостями между отказами компонентов и случаев, когда необходимо оценить вероятность выполнения хотя бы одной из нескольких функций. Однако для больших и динамических систем он может уступать методам Монте-Карло и Марковским процессам.

Выводы

Использование вероятностных методов позволяет моделировать систему и рассчитывать ее характеристики с учетом требований к надежности, времени безотказной работы и ремонтпригодности. Это позволяет учитывать все возможные комбинации исправных и неисправных элементов, что критически важно для оценки общей надежности ВС.

Рассмотренные вычислительные системы (Intel Xeon, Baikal-S, AMD EPYC) демонстрируют, как различные архитектуры и структуры модулей влияют на общую надежность.

При проектировании и анализе таких систем важно учитывать все возможные комбинации элементов, их влияние на общее состояние и способы восстановления после отказов. Использование методов включения-исключения и численных методов для получения приближенных оценок позволяет более точно оценить надежность системы, особенно в условиях различных интенсивностей отказов компонентов.

Список литературы

1. Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем // Перспективы науки и образования. 2014. № 1. С. 38-43.
2. Болбаков Р.Г. Эмерджентность сложных систем // Славянский форум. 2019. № 1 (23). С. 100–105.
3. Shooman M. L. Reliability of Computer Systems and Networks: Analysis and Design. Wiley J. & Sons, 2004.
4. Кирьянчиков В. А. Расчет показателей надежности системы анализа результатов пусков ракет космического назначения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 8.
5. Кайхан Эрджиес. Распределенные системы реального времени. Теория и практика. М.: ДМК-Пресс, Лаборатория знаний, 2020. 382 с.
6. Луканов А.С. Системы реального времени. Самара: Издательство Самарского университета, 2020. 156 с.
7. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов / Е.М. Лаврищева, Н.В. Пакулин, А.Г. Рыжов., С.В. Зеленев // Труды ИСП РАН. 2018. Т. 30, вып. 3.
8. Клименко А. Б. Повышение ресурсной эффективности распределенных архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 2. С. 124-139. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139>
9. Зинкин С.А., Мустафа Садек Джафар, Карамышева Н.С. Концептуальные представления и модификации сетей Петри для приложений в области синтеза функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем с переменной структурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 6(81). С. 143-167.
10. Safronenkova I.B., Melnik Y. E. An Estimation of the Workload Relocation Techniques Application in Distributed CAD Systems Area // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 330. P. 572-581.
11. Hinkelmann H., Zipf P., Glesner M. A scalable reconfiguration mechanism for fast dynamic reconfiguration // 2009 19th International Conference on Field Programmable Logic and Applications. 2009. P. 145–152.
12. Huang Y., Sun S., Chu J. Energy- and time-optimal reconfiguration of spacecraft clusters with collision avoidance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2023. Vol. 237(13). P. 1394–1411.
13. Шевченко С. В. Оптимизация распределенных вычислений в системах параллельной обработки данных // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. №3 (7).

14. Ворожцов А. С., Тутова Н. В., Тутов А. В. Оптимизация размещения облачных серверов в центрах обработки данных // Т-Comm. 2015. №6.
15. Цветков В. Я. Основы теории сложных систем. СПб.: Издательство «Лань», 2019. 152.
16. Болбаков Р.Г. Сложность информационных конструкций // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 4 (16). С. 58–63.
17. Розенберг И.Н. Информационная ситуация как сложная система // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 69–77.
18. Буравцев А.В., Цветков В.Я. Сложные организационно вычислительные системы // Перспективы науки и образования. 2018. № 4 (34). С. 293–300.
19. Щенников А.Н. Комплементарность сложных вычислений // Славянский форум. 2018. № 2 (20). С. 118–123.

References

1. Kuj S.A. Multidimensional consideration of complex systems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of science and education*. 2014; (1): 38-43 (In Russ.).
2. Bolbakov R.G. Emergence of complex systems. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2019; (1): 100-105 (In Russ.).
3. Shooman M. L. Reliability of Computer Systems and Networks: Analysis and Design. Wiley J. & Sons, 2004.
4. Kiryanchikov V. A. Calculation of reliability indicators of the system for analysing the results of space rocket launches. *Izv. SPbGETU «LETI». = Izvestia SPbGETU 'LETI'*. 2016; (8). (In Russ.).
5. Kayhan Erciyes: Distributed real-time systems. Theory and practice. Moscow: DMK-Press, Laboratoriya znanii; 2020. 382 p. (In Russ.).
6. Lukanov A.S. Real-time systems. Tutorial. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo universiteta; 2020. 156 p. (In Russ.).
7. Lavrisheva E.M., Pakulin N.V., Ryzhov A.G., Zelenov S.V. Analysis of the methods of reliability assessment of equipment and systems. Practical application of methods. *Trudy ISP RAN = Proceedings of ISP RAS*. 2018; 30 (3).
8. Klimenko A. B. Distributed Data Proceeding Systems Architectures Resource Efficiency Improvement on the Basis of Apriory Data about the Jobs Late Completion Times. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 124-139 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139>
9. Zinkin S.A., Mustafa Sadeq Jaafar, Karamysheva N.S. Conceptual Representations and Modifications of Petri Nets for Applications in the Area of Synthesis of a Functional

Architecture of Distributed Computational Systems with Variable Structure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 22(6): 143-167

10. Safronenkova I.B., Melnik Y. E. An Estimation of the Workload Relocation Techniques Application in Distributed CAD Systems Area. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 330: 572-581.

11. Hinkelmann H., Zipf P., Glesner M. A scalable reconfiguration mechanism for fast dynamic reconfiguration. In *2009 19th International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. 2009. P. 145–152.

12. Huang Y., Sun S., Chu J. Energy- and time-optimal reconfiguration of spacecraft clusters with collision avoidance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2023; 237(13): 1394–1411.

13. Shevchenko S. V. Optimisation of distributed computing in parallel data processing systems. *ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii = ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Management*. 2018; (3). (In Russ.).

14. Vorozhtsov A. S.; Tutova N. V., Tutov A. A.. V. Optimisation of cloud servers in data processing centres. *T-Comm*. 2015; (6). (In Russ.).

15. Tsvetkov V. Ya. Fundamentals of the theory of complex systems. St. Petersburg: Izdatel'stvo «Lan»; 2019. 152 p. (In Russ.).

16. Bolbakov R.G. Complexity of information constructions. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational resources and technologies*. 2016; (4): 58-63. (In Russ.).

17. Rosenberg I.N. Information situation as a complex system. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational resources and technologies*. 2017; (3): 69-77. (In Russ.).

18. Buravtsev A.V., Tsvetkov V.Ya. Complex organizational and computational systems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of Science and Education*. 2018; (4): 293-300. (In Russ.).

19. Schennikov A.N. Complementarity of complex computations. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2018; (2): 118-123. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Петушков Григорий Валерьевич,
младший научный сотрудник Центра
популяризации науки и высшего образования,
Институт молодежной политики
и международных отношений РТУ МИРЭА,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: petushkov@mirea.ru

Grigory V. Petushkov, Junior Researcher,
Centre for Popularisation of Science and Higher
Education, Institute of Youth Policy
and International Relations, MIREA – Russian
Technological University,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: petushkov@mirea.ru

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 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: <https://science.swsu.ru/>, 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26.

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>.