

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Известия
Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 23 № 3 / 2019

**Proceedings
of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 23 № 3 / 2019



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

Зотов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, 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, член РААСН, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

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

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

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

Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский технический университет (г. Дрезден, Германия).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

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

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

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

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

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

Кобелев Николай Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, академик РААСН, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

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

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

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

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

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя и издателя:

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

Телефон: (4712) 22-25-26,

Факс: (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

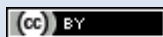
ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2019



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.

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

Периодичность: один раз в два месяца

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 20.06.19. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 19,8.

Тираж 1000 экз. Заказ 45.



Proceedings of the Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)

Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of Kursk State Technical University”

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

Machine building: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

IT, computer engineering and control systems: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

Construction engineering: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Doctor of 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

Vladimir V. Bredikhin, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, RAACS Advisor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

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

Torsten Bertram, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Institute of Control Theory and System Design, Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

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

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

Igor V. Zotov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

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

Vladimir I. Kolchunov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RAACS Advisor, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

Rashit A. Latypov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Shah R., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

EDITORIAL BOARD

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

Yurii V. Alekseev, Doctor of Architecture Sciences,
Professor, Moscow State National Research University
of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Maksim V. Bobyr, Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Southwest State University
(Kursk, Russia);

Thomas Bock, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Technical University of Munich
(Munich, Germany);

Lino Bianco, Doctor of Philosophy Sciences,
Professor of IAA, Visiting Professor at UACEG (Sofia),
Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Sergey V. Degtyarev, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Lyubomir V. Dimitrov, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, Doctor of Engineering
Sciences, Professor, Southwest State University
(Kursk, Russia);

Nikolai S. Kobelev, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vitalii I. Kolchunov, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Academician of RAACS, Southwest State
University (Kursk, Russia);

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

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

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

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

Alexander S. Sizov, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor M. Smirnov, Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Corresponding Member of RARAN,
JSC "Research engineering Institute» (Balashikha, Russia);

Vitalii S. Titov, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

Vladimir I. Shcherbakov, Doctor of Engineering
Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical
University (Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Founder and Publisher :
"Southwest State University"

Official address of the Publisher:
305040, Russia, Kursk, ul. 50 Let Oktyabrya, 94
Phone: (+74712) 22-25-26,
Fax: (+74712) 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
(PI №FS77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center
of the Southwest State University,
305040, Russia, Kursk,
ul. 50 Let Oktyabrya, 94

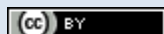
Subscription and distribution:
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219 in the Gen-
eral Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: once in two months

Free-of-control price.

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2019



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

Sent to the printer 20.06.19. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 19,8.
Circulation 1000 copies. Order 45.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Повышение эффективности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес.....	8
<i>Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н.</i>	
Разработка и исследование порошковых электродов для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов	18
<i>Латыпов Р. А., Агеев Е. В., Новиков Е. П.</i>	
Исследование вариантов реализации серий прыжков при преодолении прыгающим роботом лестничного пролета	33
<i>Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В.</i>	
Применение метода конечных элементов при расчете сварного корпуса гидроамортизатора	44
<i>Котельников А. А., Родионов Я. Э.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Изменение физико-механических характеристик грунта эксплуатируемого основания.....	54
<i>Дубракова К.О., Куценко О.И., Карцев И.Н.</i>	
Определение коэффициента интенсивности напряжений в балке с центральной трещиной и оценка критической длины трещины	65
<i>Масалов А. В.</i>	
Девелопмент объектов недвижимости культурного наследия	74
<i>Шлеенко А.В., Аннаев А.Ю., Черняева А.И.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Алгоритмы автоматизированного обучения диалоговых систем	86
<i>Спирин Д.В., Брежнев О.С.</i>	
Вариант организации многопоточной обработки конфиденциальных данных на базе клеточных автоматов	100
<i>Марухленко А. Л., Плугатарев А. В., Таныгин М. О., Марухленко Л. О., Бобынцев Д. О.</i>	
Применение глубоких нейронных сетей в задаче получения карты глубины из двумерного изображения	113
<i>Михальченко Д.И., Ивин А.Г., Сивченко О.Ю., Аксаментов Е.А.</i>	
Метод коррекции дисторсии в задачах обработки изображений этикеток	135
<i>Волков Д.А., Панищев В.С. , Труфанов М.И.</i>	
Модель формирования портфеля проектов коммерческого банка на основе теории игр	148
<i>Усманова З. А., Ханова А.А.</i>	
Особенности применения датчиков тока и напряжения при расчёте несимметрии электрической сети	160
<i>Закурдаев Р. Ю., Чернецкая И. Е.</i>	

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

Original articles

Improving the Finishing Efficiency of Coarse-Grained Gear Wheels	8
<i>Emelianov S. G., Chevychelov S. A., Khomutov R. N.</i>	
Development and Research of Flux-Cored Electrodes for Welding And Surfacing of Parts From Aluminum And Titanium Alloys	18
<i>Latypov R. A., Ageev E. V., Novikov E. P.</i>	
The Research of Jumps' Implementation Options in Overcoming Ladder Flight by the Jumping Robot.....	33
<i>Vorochaeva L. Yu., Savin S. I., Malchikov A. V.</i>	
Application of a Finite Element Method in Welded Shell Calculation of Hydraulic Shock-Absorber.....	44
<i>Kotelnikov A. A., Rodionov Y. E.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Changes in the Physic-Mechanical Characteristics of the Soil of the Operated Foundation.....	54
<i>Dubrakova K. O., Kutsenko O. I., Kartsev I. N.</i>	
Determination of Stress Intensity Factor in a Beam with a Central Crack and Estimation of the Critical Crack Length	65
<i>Masalov A. V.</i>	
Development of Real Estate Objects with Cultural Heritage	74
<i>Shleenko A. V., Annayev A. Yu., Chernyaeva A. I.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Automated Training Algorithms of Dialog Systems	86
<i>Spirin D. V., Brezhnev O. S.</i>	
A version of Organization of Multithread Processing of Confidential Data on the Basis of Cellular Automata	100
<i>Marukhlenko A. L., Plugatarev A. V., Tanygin M. O., Marukhlenko L. O., Bobyntsev D. O.</i>	
Application of Deep Neural Networks in the Problem of Obtaining Depth Maps from Two-Dimensional Images	113
<i>Mikhalchenko D. I., Ivin A. G., Sivchenko O. Yu., Aksamentov E. A.</i>	
A Method for Distortion Correction in Label Images Processing	135
<i>Volkov D. A., Panishchev V. S., Truphanov M. I.</i>	
A Model of Commercial Bank Projects Portfolio Building Based on the Game Theory	148
<i>Usmanova Z. A., Khanova A. A.</i>	
Specific Features of Application of Current and Voltage Transducers When Calculating Electrical Network Unbalance	160
<i>Zakurdaev R. Yu., Chernetskaya I. E.</i>	

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>

Повышение эффективности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес

С.Г. Емельянов¹, С.А. Чевычелов¹ ✉, Р.Н. Хомутов¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: mtio@kurskstu.ru

Резюме

Цель исследования. Повышение производительности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением.

Методы. Метод дискретного копирования, теория проектирования режущих инструментов, методы математического и компьютерного программирования.

Результаты. Анализ источников показал, что повышение производительности чистового фрезерования крупномодульных зубчатых колес за счет использования возможностей современного оборудования с программным управлением является актуальной задачей. Рассмотрены вопросы повышения производительности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением гиперболюидными фрезами, оснащенными сменными многогранными пластинами (СМП) с прямолинейной режущей кромкой, расположенной под углом λ к оси вращения инструмента. Предложен метод управления точностью формообразования поверхностей, образующая которых представляет собой участок (совокупность участков) выпуклых кривых за счет установки режущего инструмента относительно профиля эвольвенты (четвертая ось станка) и относительно направления подачи (пятая ось станка). Авторами разработан метод дискретного копирования набором гиперболюидных фрез боковой поверхности зуба крупномодульных зубчатых колес, который позволяет обеспечить 6 степень точности по параметру погрешность профиля зуба.

Заключение. Приведенные результаты исследования позволяют повысить производительность чистовой обработки зубьев крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением за счет сокращения количества проходов, необходимых для обработки одной боковой поверхности зуба, в сравнении с методами непрерывного обката и высокоскоростного концевоего фрезерования. Предложенные конструкции режущего инструмента обладают достаточной универсальностью для обработки широкой номенклатуры крупномодульных зубчатых колес, что актуально в ремонтном и мелкосерийном производстве.

Ключевые слова: крупномодульные зубчатые колеса; гиперболюидные фрезы; точность обработки; методы формообразования.

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

© Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н., 2019

Для цитирования: Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н. Повышение эффективности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>.

Статья поступила в редакцию 06.05.2019

Статья подписана в печать 30.05.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>

Improving the Finishing Efficiency of Coarse-Grained Gear Wheels

Sergei G. Emelianov¹, Sergey A. Chevychelov¹ ✉, Roman N. Khomutov¹

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

✉ e-mail: mtio@kurskstu.ru

Abstract

Purpose of research. Improving the finishing performance of coarse-grained gear wheels on software-controlled machines.

Methods. The method of discrete copying, the theory of designing cutting tools, methods of mathematical and computer programming.

Results. It is an urgent task to improve the performance of fine milling of coarse-grained gear wheels by using the capabilities of modern software-controlled equipment. Here we consider the issues of improving the finishing performance of coarse-grained gear wheels on software-controlled machines of hyperboloid mills equipped with interchangeable polyhedral plates (IPP) with a straight cutting edge located at an angle λ to the instrument axis of rotation. It is proposed a method for controlling the accuracy of shaping surfaces, generatrix of which forms a section (set of sections) of convex curves by installing a cutting tool relative to the involute profile (fourth axis of the machine) and relative to the feed direction (fifth axis of the machine). The authors have developed a discrete copying method with a set of hyperboloid cutters of tooth surface of coarse-grained gear wheels. It allows us to ensure the 6th degree of accuracy in the parameter of the tooth profile error.

Conclusion. The results of the study improve the finishing performance treatment of the teeth of coarse-grained gear wheels on software-controlled machines by reducing the number of passes required for machining one side of the tooth in comparison with the methods of continuous rolling and high-speed end milling. The proposed designs of cutting tools have sufficient versatility to handle a wide range of coarse-grained gear wheels, which is important in the repair and small-scale production.

Keywords: coarse-grained gear wheels; hyperboloid mills; processing accuracy; molding methods.

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

For citation: Emelianov S. G., Chevychelov S. A., Khomutov R.N. Improving the Finishing Efficiency of Coarse-Grained Gear Wheels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 8-17 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>.

Received 06.05.2019

Accepted 30.05.2019

Введение

Формообразование профильных поверхностей, которые имеют образующую в виде выпуклой кривой, обычно осуществляется с помощью использования фасонного инструмента или дискретной обработкой стандартным инструментом. Решение такой задачи осложняется, если обрабатываемая поверхность не является открытой. В случае формообразования профиля боковой поверхности зуба крупномодульного зубчатого колеса альтернативой традиционным методам могут являться способы, основанные на использовании возможностей современного оборудования с программным управлением. Такие способы позволяют применять высокоэффективные материалы режущей части инструментов с СМП, при этом нет необходимости использования специализированного оборудования для зубообработки.

Цель данной работы:

повышение производительности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением.

Объект исследования: метод формообразования боковой поверхности зуба крупномодульных зубчатых колес сборными гиперболоидными фрезами.

Предмет исследования: точность обработки боковой поверхности зуба прямозубого зубчатого колеса сборными гиперболоидными фрезами.

На рисунке 1 представлена классификация способов формообразования боковой поверхности зубьев прямозубых цилиндрических колес на не специализированном оборудовании с программным управлением.

Метод непрерывного обката позволяет дисковой фрезой, оснащенной твердосплавными пластинками, производить чистовую обработку боковой поверхности зубьев за несколько десятков проходов в зависимости от степени точности колеса (рис. 2) [1].

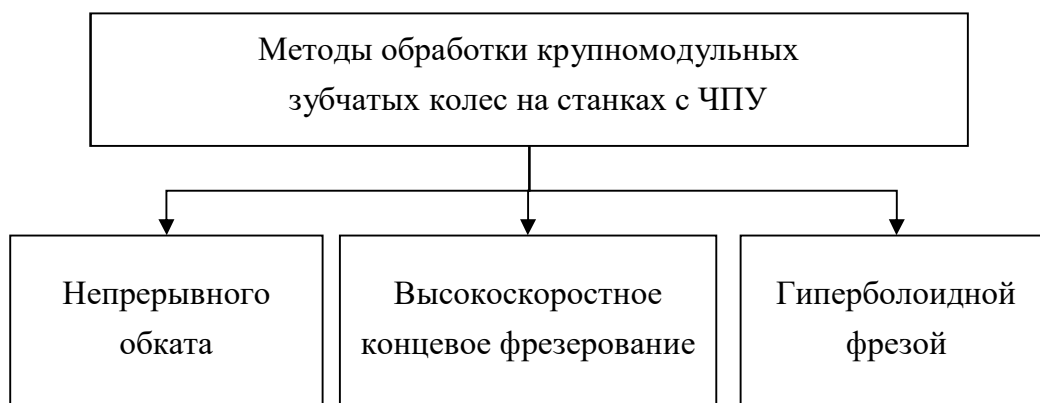


Рис. 1. Методы обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с ЧПУ

Fig. 1. Methods of processing of large-modular gear wheels on the CNC machines

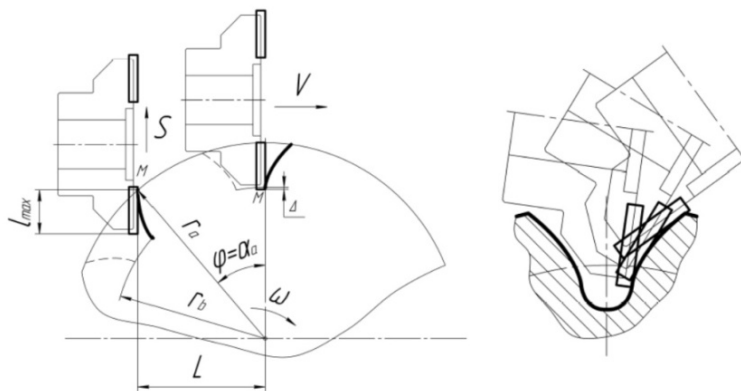


Рис. 2. Схема обработки зубчатого колеса методом непрерывного обката [1]

Fig. 2. The diagram of processing of large-modular gear by the method of continuous rolling [1]

При обработке сферической концевой фрезой на токарном обрабатывающем центре методом концевой фрезе-

рования можно применять либо горизонтальную, либо вертикальную стратегии обработки (рис. 3) [2].

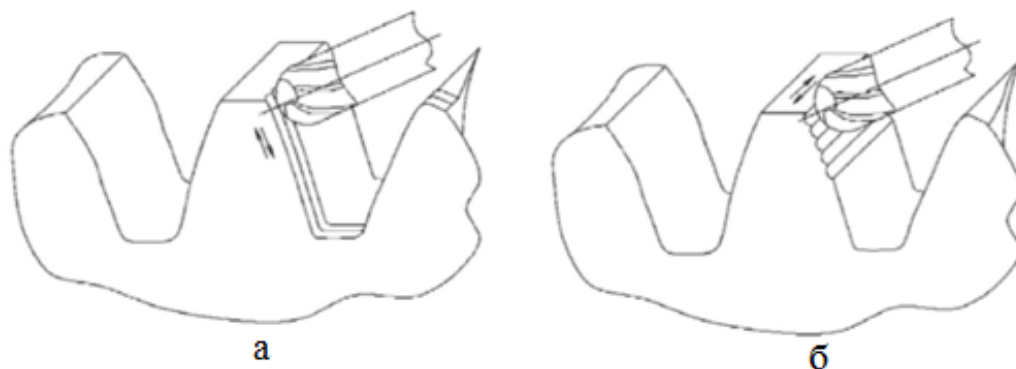


Рис. 3. Схема обработки методом высокоскоростного концевой фрезерования:
а – вертикальная стратегия обработки; б – горизонтальная стратегия обработки

Fig. 3. Processing diagram by high speed end milling:
a – vertical processing strategy; b – horizontal processing strategy

Материалы и методы решения задачи

Повышения производительности данного процесса можно достичь использованием гиперболических фрез, оснащенных СМП с прямолинейной режущей кромкой, расположенной под углом λ к оси вращения инструмента [3-8]. В случае крупносерийного производства целесообразно проектировать

специальные гиперболические фрезы, которые позволяют производить формообразование боковой поверхности зуба за один проход, т.е. обеспечить максимальную производительность процесса [9-14]. В то же время, если зуб гиперболической фрезы будет состоять из одной СМП с заданной длиной режущей кромки l , то таким инструментом можно будет получать разные участки про-

филя обрабатываемой поверхности за счет установки фрезы (рис. 4) относительно профиля эвольвенты ψ° (4 ось станка) и относительно направления подачи ζ° (5 ось станка) [15-17].

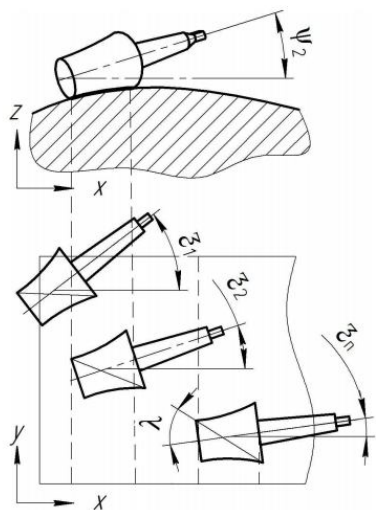


Рис. 4. Углы установки инструмента и производящей линии

Fig. 4. The angles of the tool and the generating line

Количество зубьев такой фрезы определяется возможностью размещения их на заданном диаметре фрезы, который, в свою очередь, определяется размерами впадины зубчатого колеса [13,14,16].

Значения параметров, влияющих на процесс формообразования

боковой поверхности зуба прямозубого колеса ($m=12, z=12$)

Values of parameters affecting the process of forming the lateral surface of the gear of the spur wheel ($m=12, z=12$)

	фреза 1		фреза 2	
проход	1	2	3	4
λ°	25		25	
l , режущей кромки СМП, мм	9,30		4,00	
R , радиус фрезы, мм	10,00		7,00	
ψ°	38,79	27,42	19,98	11,12
ζ°	18,70	34,61	36,30	50,63

При использовании стандартной СМП с длинной режущей кромки 9 мм. для обработки одной боковой поверхности зуба понадобится всего несколько проходов. Формирование участков эвольвенты с различной кривизной обеспечивается изменением угла установки фрезы относительно направления подачи ζ [18-19].

Результаты и их обсуждение

Таким образом, для прямозубого колеса с параметрами $m=12, z=12$ понадобится комплект из 2 гиперболоидных фрез, каждая из которых совершит по 2 прохода. В этом случае погрешность формирования бокового профиля фрезы не превысит 0,008 мм (рис. 5) [16, 20]. Это позволяет обеспечить 6 степень точности по параметру – погрешность профиля зуба ($f_{fr} \leq 0,016$ мм).

В таблице приведены параметры этого комплекта фрез и технологические параметры установки относительно профиля эвольвенты ψ° и относительно направления подачи ζ° .

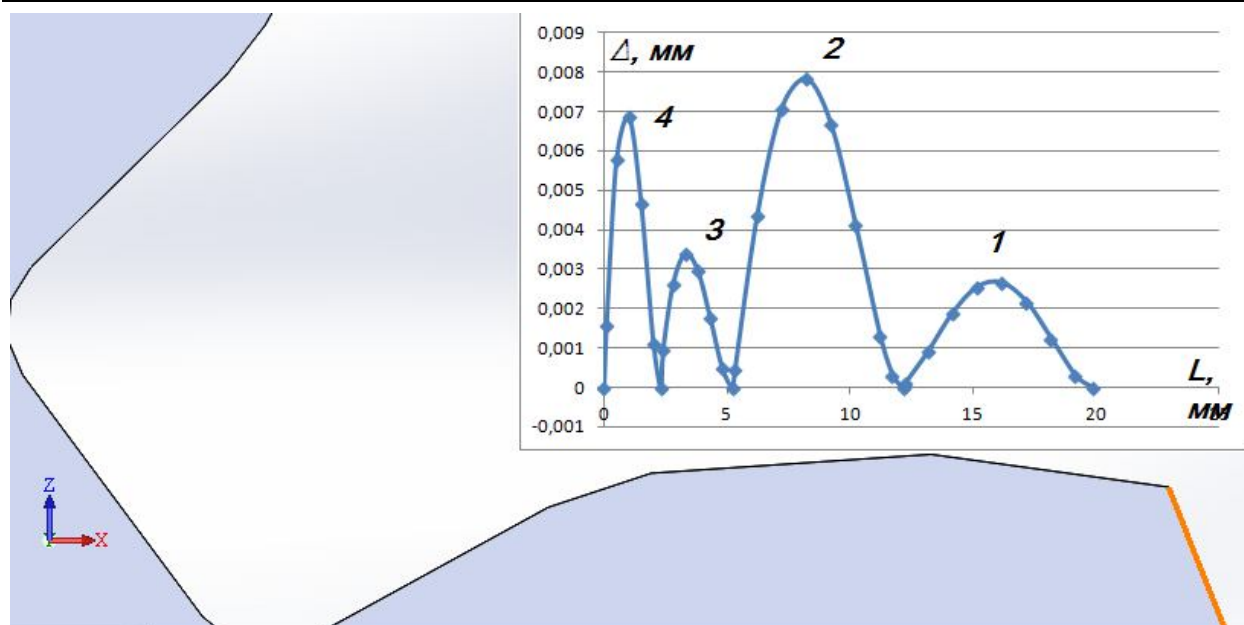


Рис.5. Погрешность профиля зуба, формируемого комплектом гиперболоидных фрез

Fig. 5. The inaccuracy of the gear wheel profile, which is formed by a set of hyperboloid cutters

Выводы

Приведенные результаты исследования позволят повысить производительность чистовой обработки зубьев крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением за счет сокращения количества проходов, необходимых для обработки одной бо-

ковой поверхности зуба, в сравнении с методами непрерывного обката и высокоскоростного концевой фрезерования.

Предложенные конструкции режущего инструмента обладают достаточной универсальностью для обработки широкой номенклатуры крупномодульных зубчатых колес, что актуально в ремонтном и мелкосерийном производстве.

Список литературы

1. Отт О.С. Сборные дисковые зуборезные фрезы и процесс механической обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с ЧПУ // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2011. № 1 (11). С. 174-177.
2. Басова Е.В., Добротворский С.С. Кинематика формообразования эвольвентной и трохоидальной поверхностей при высокоскоростном концевом фрезеровании // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2011. № 2. С.132-137.
3. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Чистяков П.П. Разработка САПР гиперболоидных фрез для обработки эвольвентных профилей // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 4 (205). С. 42-46.

4. Emelyanov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Chevychelov I.N. Optimization of parameters for hyperbolic railhead profile // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. Tomsk, 2015. С. 1-4.*
5. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. The dimensional analysis at modular tool design // *Modern materials and technologies. 2009. № 1. С. 219-224.*
6. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Чистяков П.П. Схемы формообразования гиперболоидными инструментами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-1. С. 133-140.*
7. Чевычелов С.А., Гладышкин А.О. Определение параметров производящей поверхности гиперболоидных фрез // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2-3. С. 113-115.*
8. Чевычелов С.А., Чевычелов И.Н. Особенности проектирования гиперболоидных инструментов // *Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 3 (3). С. 260-264.*
9. Чевычелов С.А., Чистяков П.П., Олексюк В.С. Повышение производительности обработки зубчатых колес // *Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 148-151.*
10. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Повышение качества обработанной поверхности путем выбора рациональной схемы формообразования // *Проблемы машиностроения и автоматизации. 2004. № 3. С. 86-88.*
11. Чевычелов С.А. Определение параметров гиперболического профиля головки рельсов // *Известия Курского государственного технического университета. 2010. № 4 (33). С. 72-75.*
12. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Методика проектирования гиперболических фрез для репрофилирования старогонных рельсов // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технологическая системотехника. 2005. № 4. С. 32-35.*
13. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Бобрышев Д.А. Влияние начального радиуса сборных гиперболических фрез на параметры точности корпуса инструмента // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 2 (51). С. 27-29.*
14. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Анализ влияния начального радиуса гиперболической фрезы на ее выходные параметры // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. Приборостроение. 2006. № 2. С. 36-41.*
15. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Бобрышев Д.А. Влияние угла поворота сборных гиперболических фрез относительно оси симметрии рельса на параметры точности корпуса инструмента // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 3-4 (287). С. 9.*
16. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Анализ влияния начальных данных на выходные параметры процесса проектирования гиперболических фрез // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технология машиностроения. 2006. С. 138-140.*
17. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Бобрышев Д.А. Влияние угла поворота сборных гиперболических фрез относительно оси симметрии рельса на параметры точно-

сти корпуса инструмента // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 4-3 (288). С. 9-13.

18. Emelyanov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. A method of processing of involute profiles of large-module gear wheels // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 698. P. 546-551.

19. Чевычелов С.А. Оптимизация параметров гиперболических фрез // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012. № 2-1. С. 98-100.

20. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Errors of profile formed by hyperbolic mills. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 31-34.

Reference

1. Ott O.S. Sbornye diskovye zuboreznye frezy i protsess mekhanicheskoi obrabotki krupnomodul'nykh zubchatykh koles na stankakh s ChPU [Teams disc gear cutter and the machining process of coarse-grained gear wheels on CNC machines]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI = Proceedings of Moscow state technical University MAMI*, 2011, no. 1 (11), pp. 174-177 (In Russ.).

2. Basova E.V., Dobrotvorskii S.S. Kinematika formoobrazovaniya evol'ventnoi i trokhoidal'noi poverkhnosti pri vysokoskorostnom kontsevom frezerovanii [Kinematics of formation of involute and trochoidal surfaces at high-speed end milling]. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2011, no. 2, pp.132-137 (In Russ.).

3. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. Razrabotka SAPR giperboloidnykh frez dlya obrabotki evol'ventnykh profilei [The development of CAD hyperboloid of milling cutters for machining of involute profiles]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem = The Directory. Engineering journal with the app*, 2014, no. 4 (205), pp. 42-46 (In Russ.).

4. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Chevychelov I.N. Optimization of parameters for hyperbolic railhead profile // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. Tomsk, 2015*. С. 1-4.

5. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. The dimensional analysis at modular tool design. *Modern materials and technologies*, 2009, no. 1, pp. 219-224.

6. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. Skhemy formoobrazovaniya giperboloidnymi instrumentami [Schemes of formation of hyperboloid instruments]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula state University. Technical science*, 2017, no. 8-1, pp. 133-140 (In Russ.).

7. Chevychelov S.A., Gladishkin A.O. Opredelenie parametrov proizvodnyashchei poverkhnosti giperboloidnykh frez [Determination of the parameters of the producing surface of hyperboloid mills]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya:*

Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and technology, 2012, no. 2-3, pp. 113-115 (In Russ.).

8. Chevychelov S.A., Chevychelov I.N. Osobennosti proektirovaniya giperboloidnykh instrumentov [Design features of hyperboloid tools]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, engineering and technology*, 2015, no. 3 (3), pp. 260-264.

9. Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Oleksjuk V.S. Povyshenie proizvoditel'nosti obrabotki zubchatykh koles [Increase of productivity of gears processing]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual problems in mechanical engineering*, 2015, no. 2, pp. 148-151 (In Russ.).

10. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Povyshenie kachestva obrabotannoi poverkhnosti putem vybora ratsional'noi skhemy formoobrazovaniya [Improving the quality of the treated surface by choosing a rational scheme of shaping]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of engineering and automation*, 2004, no. 3, pp. 86-88 (In Russ.).

11. Chevychelov S.A. Opredelenie parametrov giperbolicheskogo profilya golovki rel'sov [Determination of the parameters of the hyperbolic profile of the rail head]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk state technical University*, 2010, no. 4 (33), pp. 72-75 (In Russ.).

12. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Metodika proektirovaniya giperbolicheskikh frez dlya reprofilirovaniya starogodnykh rel'sov [Methods of designing hyperbolic mills for reprofiling old-fashioned rails]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya sistemotekhnika = Proceedings of the Tula State University. Series: Process system engineering*, 2005, no. 4, pp. 32-35 (In Russ.).

13. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. Vliyanie nachal'nogo radiusa sbornykh giperbolicheskikh frez na parametry tochnosti korpusa instrumenta [Influence of the initial radius of precast hyperbolic cutters on the accuracy parameters of the tool body]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Processing (technology, equipment, tools)*, 2011, no. 2 (51), pp. 27-29 (In Russ.).

14. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Analiz vliyaniya nachal'nogo radiusa giperbolicheskoi frezy na ee vykhodnye parametry [Analysis of the influence of the initial radius of the hyperbolic mill on its output parameters]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. Priborostroenie = Izvestiya Orel State Technical University. Series: Mechanical Engineering. Instrument making*, 2006, no. 2, pp. 36-41 (In Russ.).

15. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. Vliyanie ugla povorota sbornykh giperbolicheskikh frez otnositel'no osi simmetrii rel'sa na parametry tochnosti korpusa instrumenta [The influence of the angle of rotation of hyperbolic milling cutters with respect to the axis of symmetry of the rail on the accuracy parameters of the tool body]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2011, no. 3-4 (287), pp. 9 (In Russ.).

16. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Analiz vliyaniya nachal'nykh dannyykh na vykhodnye parametry protsessa proektirovaniya giperbolicheskikh frez [Analysis of the influence of initial data on the output parameters of the design process of hyperbolic mills]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnologiya mashinostroeniya. News of Tula state University. Series: Mechanical engineering technology*, 2006, pp. 138-140 (In Russ.).
17. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. Vliyanie ugla povorota sbornyykh giperbolicheskikh frez otnositel'no osi simmetrii rel'sa na parametry tochnosti korpusa instrumenta [The influence of the angle of rotation of hyperbolic milling cutters with respect to the axis of symmetry of the rail on the accuracy parameters of the tool body]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2011, no. 4-3 (288), pp. 9-13 (In Russ.).
18. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. A method of processing of involute profiles of large-module gear wheels. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 698, pp. 546-551.
19. Chevychelov S.A. Optimizatsiya parametrov giperboloidnykh frez [Optimization of the parameters of the hyperboloid cutters]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University, Series: Engineering and Technologies*. 2012, no. 2-1, pp. 98-100 (In Russ.).
20. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Errors of profile formed by hyperbolic mills. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 31-34.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергей Геннадьевич Емельянов, доктор технических наук, профессор, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>

Sergei G. Emelianov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: rector@swsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>

Сергей Александрович Чевычелов, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mtio@kurskstu.ru

Sergey A. Chevychelov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: mtio@kurskstu.ru

Роман Николаевич Хомутов, преподаватель, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: korshun_87@mail.ru

Roman N. Khomutov, Senior Lecturer, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: korshun_87@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-18-32>

Разработка и исследование порошковых электродов для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов

Р. А. Латыпов ¹, Е. В. Агеев ²✉, Е. П. Новиков ²

¹ ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Российская Федерация

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

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью работы являлось исследование свойств порошковых материалов, получаемых из алюминиевых и титановых отходов методом электроэрозионного диспергирования для разработки электродов, пригодных для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов.

Методы. Для получения алюминиевого порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали алюминиевую проволоку ГОСТ 14838-78, предварительно нарезанную по 5-7 см. Проволоку загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 100 В, частота импульсов 100 Гц. Для получения титанового порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали стружку марки ВТ6. Стружку загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной водой. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 150 В, частота импульсов 250 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение материала с образованием дисперсных частиц порошка.

С целью изучения формы и морфологии частиц порошкового материала, полученных методом электроэрозионного диспергирования из алюминиевых отходов, были сделаны снимки на растровом (сканирующем) электронном микроскопе QUANTA 600 FEG. Исследование гранулометрического состава порошковых материалов, полученных способом электроэрозионного диспергирования из алюминиевых и титановых отходов, проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoTec.

Результаты. Установлено, что наиболее перспективными и промышленно не применяемыми материалами для производства электродов, применяемых при сварке и наплавке деталей, являются порошковые материалы, получаемые методом электроэрозионного диспергирования. Экспериментально установлено, что порошковые материалы, получаемые электроэрозионным диспергированием алюминиевых и титановых отходов, состоят из частиц сферической и эллиптической формы. Представлены результаты исследования элементного состава порошковых материалов, получаемых электроэрозионным диспергированием алюминиевых и титановых отходов, показано, что основными элементами порошков, полученных из алюминиевых отходов, являются алюминий и кислород, а основными элементами порошков, полученных из стружки марки ВТ6, являются Ti, Al, O, V, Fe, W и K. Исследования гранулометрического состава порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования, показали, что средний размер частиц порошков, полученных из алюминиевых отходов, составляет 19,08 мкм, а средний размер частиц порошков, полученных из титановых отходов, составляет 33,12 мкм. Установлено, что наиболее перспективным методом для производства электродов, используемых для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов, является метод искрового плазменного спекания.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.

Ключевые слова: алюминиевые и титановые сплавы; сварка и наплавка; электрод; электроэрозионный порошок.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-50065.

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

Для цитирования: Латыпов Р. А., Агеев Е. В., Новиков Е. П. Разработка и исследование порошковых электродов для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 18-32. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-18-32>.

Статья поступила в редакцию 08.04.19

Статья подписана в печать 15.05.09

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-18-32>

Development and Research of Flux-Cored Electrodes For Welding And Surfacing Of Parts From Aluminum And Titanium Alloys

Rashit A. Latypov ¹, Evgeniy V. Ageev ² ✉, Evgeny P. Novikov ²

¹ Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation

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

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research was to study the properties of powder materials obtained from aluminum and titanium waste by the method of electroerosion dispersion for the development of electrodes suitable for welding and surfacing of parts from aluminum and titanium alloys.

Methods. To obtain an aluminum powder material by electroerosion dispersion method, an aluminum wire GOST 14838-78 was used, pre-cut to 5-7 cm. the Wire was loaded into a reactor filled with a working liquid – distilled. The process was carried out at the following electrical parameters: discharge capacitor capacity 65 UF, voltage 100 V, pulse frequency 100 Hz. To obtain a titanium powder material by electroerosion dispersion method, shavings of VT6 grade were used. The chips were loaded into a reactor filled with a working liquid – distilled water. The process is carried out at the following electrical parameters: capacity of the bit capacitors 65 µf, a voltage of 150 V, pulse frequency of 250 Hz. The result of the local effects of intermittent electrical discharges between the electrodes was the destruction of the material with the formation of dispersed particles of powder.

In order to study the shape and morphology of powder material particles obtained by electroerosion dispersion from aluminum waste, images were taken on a raster (scanning) electron microscope QUANTA 600 FEG.

The study of granulometric composition of powder materials obtained by the method of electroerosion dispersion of aluminum and titanium waste was carried out on a laser analyzer particle size Analysette 22 NanoTec.

Results. It is established that the most promising and not industrially used materials for the production of electrodes used in welding and surfacing of parts are powder materials obtained by electroerosion dispersion. It is experimentally established that the powder materials obtained by electroerosive dispersion of aluminum and titanium wastes consist of spherical and elliptical particles. The results of the study of the elemental composition of powder

materials obtained by electroerosive dispersion of aluminum and titanium waste, it is shown that the main elements of the powders produced and aluminum waste are aluminum and oxygen, and the main elements of the powders produced and shavings of the VT6 BRAND are Ti, Al, O, V, Fe, W and K. Studies of the particle size distribution of powder materials obtained by electroerosion dispersion showed that the average particle size of powders obtained from aluminum waste is 19.08 microns, and the average particle size of powders obtained from titanium waste is 33.12 microns. It is established that the most promising method for the production of electrodes used for welding and surfacing of parts from aluminum and titanium alloys is the method of spark plasma sintering.

Conclusion. The obtained results can be used to create resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.

Keywords: aluminum and titanium alloys; welding and surfacing; electrode; electroerosion powder.

Acknowledgements: the Study was supported by RFBR in the framework of scientific project № 19-38-50065.

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

For citation: Latypov R. A., Ageev E. V., Novikov E. P. Development And Research of Flux-Cored Electrodes for Welding and Surfacing of Parts from Aluminum and Titanium Alloys. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 18-32 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-18-32>.

Received 08.04.19

Accepted 15.05.19

Введение

Электроискровое легирование нашло применение в областях машиностроения и металлообработки: автомобильное производство; общее машиностроение; производство технологической оснастки; обработка штампов для термической обработки металлов; повышение режущих свойств обрабатываемого инструмента; упрочнение зубьев шестерён; повышение износостойкости шеек коленчатых валов и другие области применения; ремонтные операции при восстановлении работоспособности повреждённых деталей. Благодаря локализации площади обработки, способ электроискрового упрочнения применяются при ремонте часов и ювелирных изделий. Также метод применяют при создании действующих металлических

копий автомобилей, кораблей, самолётов. Метод позволяет наносить покрытие на стекло и керамику [1-5].

Метод поверхностного упрочнения получил развитие благодаря ряду потребительских свойств:

- возможность осуществлять точечное воздействие на площади, не превышающей долей миллиметра;
- защита окружающей поверхности не требуется;
- обеспечение надёжного контакта нанесённой лигатуры с основной поверхностью обрабатываемой детали;
- высокая степень адгезии объясняется тем, что при процессе происходит частичная диффузия (проникновение) вглубь металла;
- возникновение небольшого теплового фона; в результате, отсутствует

нагрев поверхности, не возникает деформация изделия;

- простой технологический процесс; не требуется специальной подготовки поверхности;

- энергоёмкость не превышает 2 кВт;

- оборудование имеет небольшие габаритные размеры и массу;

- высокий КПД, (массовый перенос металла находится в диапазоне 60-80%) [6-8].

Для восстановления деталей из алюминиевых и титановых сплавов также наиболее целесообразно использовать электроискровое легирование. Метод электроискрового легирования отличается технологической гибкостью, дешевизной и позволяет получать покрытия с широким диапазоном свойств.

Однако во многих случаях свойства электроискровых покрытий деталей машин зависят от состава, структуры и свойств электродного материала. С практической точки зрения, наибольший интерес представляют электроды с наноразмерными частицами. Выполненный анализ опубликованных научно-исследовательских работ показал, что наиболее перспективным методом получения наноразмерных материалов практически из любого токопроводящего материала, в том числе и отходов алюминия и титана, является метод электроэрозионного диспергирования, отличающийся экологической чистотой процесса, относительно невысокими энергетическими затратами и компактностью технологического оборудования [9-13].

Целью настоящей работы являлось исследование свойств порошковых материалов, получаемых из алюминиевых и титановых отходов методом электроэрозионного диспергирования для разработки электродов, пригодных для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов.

Материалы и методы

Для получения алюминиевого порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали алюминиевую проволоку ГОСТ 14838-78, предварительно нарезанную по 5-7 см. Проволоку загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной водой [14-15]. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 100 В, частота импульсов 100 Гц.

Для получения титанового порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали стружку марки ВТ6. Стружку загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной водой [16-19]. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 150 В, частота импульсов 250 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение материала с образованием дисперсных частиц порошка.

Полученный порошок был высушен, после чего были проведены исследования формы, морфологии и элементного состава частиц алюминиевого порошка.

С целью изучения формы и морфологии частиц порошкового материала, полученных методом электроэрозионного диспергирования из алюминиевых отходов, были сделаны снимки на растровом (сканирующем) электронном микроскопе QUANTA 600 FEG.

Микроскоп позволяет получать изображения различных объектов с увеличением, превышающим 100000 крат, с большим числом элементов разложения. Он предназначен для выполнения различных исследований с минимальными затратами времени на препарирование объектов, обеспечивая их наблюдение с исключительной глубиной резкости. QUANTA 600 FEG позволяют работать с разнообразными типами образцов (в том числе непроводящими, загрязненными, влажными образцами и образцами, способными к газовой выделению при вакуумировании).

При помощи растровой электронной микроскопии имеется возможность непосредственного анализа частиц порошка с достаточно высоким разрешением. В растровом электронном микроскопе достигается большая глубина фокуса, что позволяет наблюдать объемное изображение изучаемой структуры.

Исследование гранулометрического состава порошковых материалов, полученных способом электроэрозионного

диспергирования из алюминиевых и титановых отходов, проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoTec.

Analysette 22 NanoTec является идеальным лазерным прибором для измерения размера частиц для определения распределения размеров частиц в порошкообразных пробах, твердых веществах, в суспензиях и эмульсиях. Таким образом, прибор отлично подходит для применения в контроле качества и технологического процесса, так же, как и в исследованиях и разработках.

В Analysette 22 NanoTec общий диапазон измерения от 0,01 – 2100 мкм можно регистрировать без перенастройки оптических элементов. При этом изменяется расстояние между детектором и измерительной ячейкой путем автоматического перемещения. В измерительной ячейке находятся подготовленные с помощью используемого блока диспергирования частицы пробы, помещенные на путь лазерного луча. Путем изменения расстояния между детектором и измерительной ячейкой каждый раз регистрируется новый угловой диапазон рассеянного света. На основании этих данных рассчитывается распределение частиц по размерам.

Рентгеноспектральный анализ выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG.

Под рентгеноспектральным микроанализом понимают определение элементного состава микрообъектов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению. Для анализа характеристического спектра в рентгеноспектральном микроанализе используют два типа спектрометров (бескристалльный либо с кристаллом-анализатором), базой для РСМА служит электронно-оптическая система растрового электронного микроскопа.

При взаимодействии электронного зонда с образцом (рис. 1) одним из возбуждаемых сигналов является рентгеновское излучение, которое можно разделить на характеристическое и тормозное.

Тормозное рентгеновское излучение возникает вследствие торможения первичных электронов в электрическом (кулоновском) поле атомов анализируемого материала. Кинетическая энергия первичных электронов в этом случае частично или полностью преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Соответственно излучение имеет непрерывный спектр с энергией от нуля до энергии падающего электрона, и поэтому его еще называют непрерывным рентгеновским излучением. При рентгеноспектральном микроанализе тормозное излучение нежелательно, так как вносит основной вклад в увеличение уровня фона и не может быть исключено.

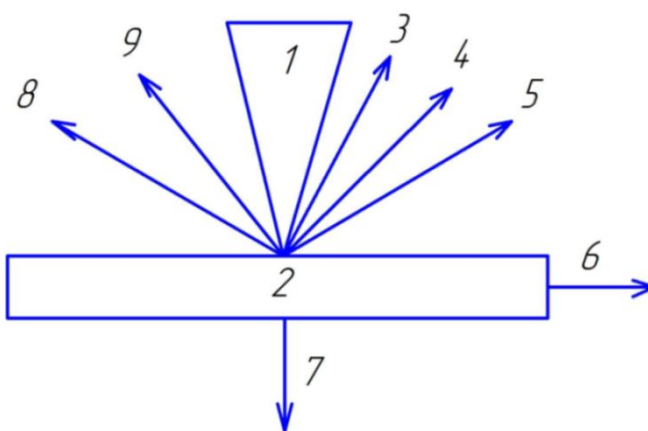


Рис. 1. Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом: 1 – электронный луч; 2 – объект; 3 – отраженные электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – Оже-электроны; 6 – ток поглощенных электронов; 7 – прошедшие электроны; 8 – катодно-люминесцентное излучение; 9 – рентгеновское излучение

Fig. 1. Effects of interaction of an electron beam with an object: 1-electron beam; 2-Object; 3-reflected electrons; 4-secondary electrons; 5-Auger electrons; 6-absorbed electrons current; 7-past electrons; 8-cathodoluminescent radiation; 9 – x-ray emission

При проникновении первичных электронов в образец они тормозятся не только электрическим полем атомов, но и непосредственным столкновением с

электронами атомов материала. В результате этого первичные электроны могут выбивать электроны с внутренних К-, L- или М-оболочек, оставляя

атом образца в энергетически возбужденном состоянии. Образующиеся вакансии заполняются переходами электронов с более высоких энергетических уровней. Атом переходит в основное состояние, избыточная энергия выделяется в виде кванта рентгеновского излучения.

Поскольку энергия возникающего кванта зависит только от энергии участвующих в процессе электронных уровней, а они являются характерными для каждого элемента, возникает характеристическое рентгеновское излучение. Так каждый атом имеет вполне определенное конечное число уровней, между которыми возможны переходы только определенного типа, характеристическое рентгеновское излучение дает дискретный линейчатый спектр.

Важной характеристикой РСМА является его локальность, т.е. объем вещества, в котором возбуждается характеристическое рентгеновское излучение. Он определяется в первую очередь диаметром электронного зонда на образце и зависит от ускоряющего напряжения и химического состава материала.

Анализ распределения элементов может быть выполнен в качественном, полуколичественном и количественном виде. Качественный анализ определяет тип элементов, входящих в состав исследуемого участка образца. Если образец имеет несколько фаз (участков), химический состав которых неизвестен, то выполняется качественный анализ каж-

дой фазы. После качественного анализа часто проводят количественный анализ в отдельно выбранных точках, по полученным данным программное обеспечение позволяет определить тип фазы исходя из ее химического состава. Полуколичественный анализ реализуется, если требуется определить распределение элементов вдоль линий (линейный анализ). Линейный анализ выполняется методом шагового сканирования, т.е. путем последовательного проведения анализа в отдельных точках. Таким образом, осуществляется количественное определение концентрации элементов с заданной точностью.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования свойств порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования алюминиевых и титановых отходов, представлены на рисунках 3-5.

На рисунке 3 показано, что порошковые материалы, полученные электроэрозионным диспергированием алюминиевых и титановых отходов, состоят из частиц сферической, эллиптической и осколочной формы.

Из рисунка 4 видно, что основными элементами порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием алюминиевых отходов, являются Al и O, а основными элементами порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием титановых отходов, являются Ti, Al, O, V, Fe, W и K.

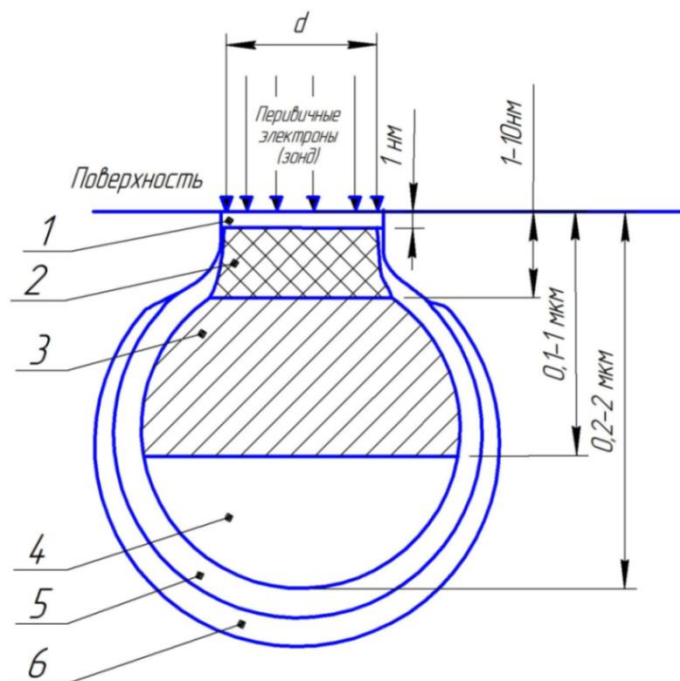


Рис. 2. Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов (зонд): 1 – Оже-электронов; 2 – вторичных электронов; 3 – отраженных электронов; 4 – характеристического рентгеновского излучения; 5 – тормозного рентгеновского излучения, 6 – флуоресценции

Fig. 2. Region signals and the spatial resolution of the irradiation surface of the object by the flow of electrons (probe): 1 – auger-electron; 2 – secondary electron; 3 – reflected electrons; 4 – is the characteristic x-ray radiation; 5 – brake x-ray radiation; 6 – fluorescence

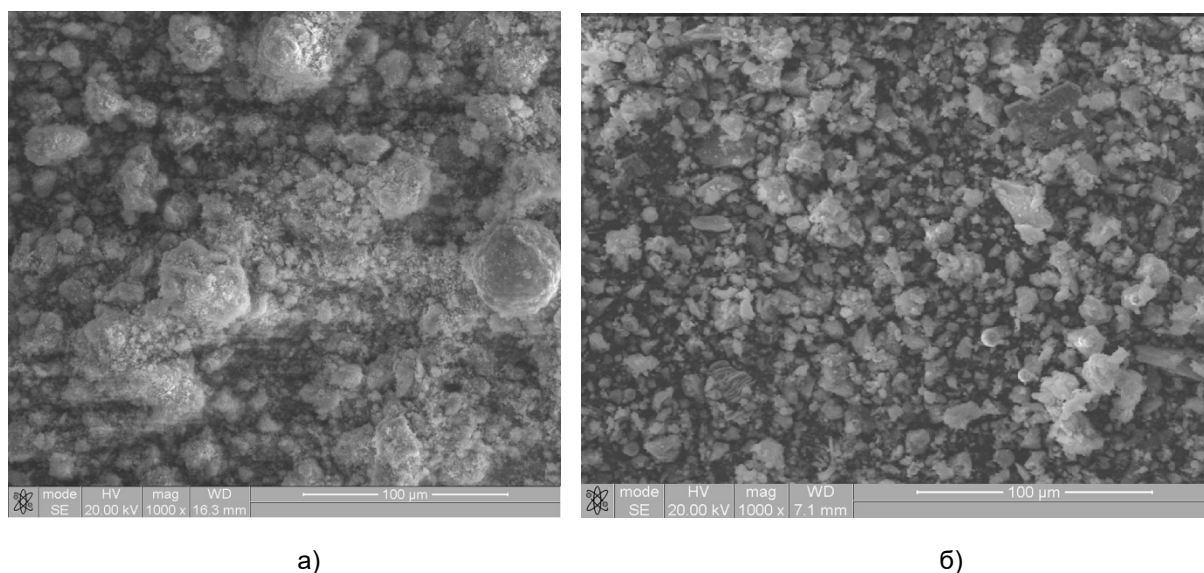


Рис. 3. Микроструктуры порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования: а - алюминиевых отходов; б - титановых отходов

Fig. 3. Microstructures of powder materials obtained by electroerosion dispersion: а - aluminum waste; б – titanium waste

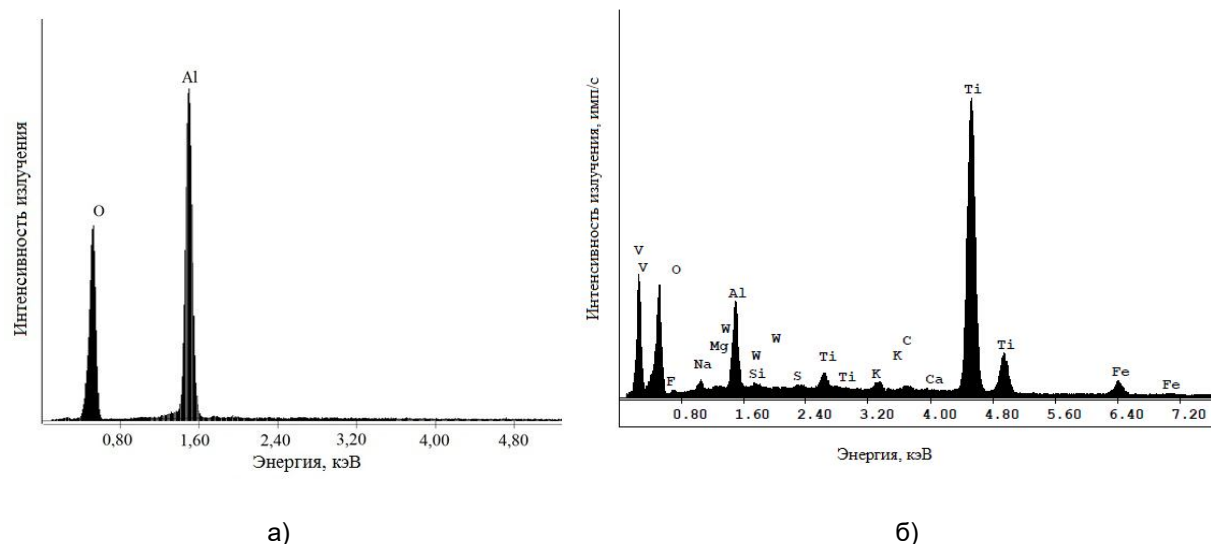


Рис. 4. Элементный состав порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования: а – алюминиевых отходов; б – титановых отходов

Fig. 4. Elemental composition of powder materials obtained by electroerosion dispersion: а – aluminum waste; б – titanium waste

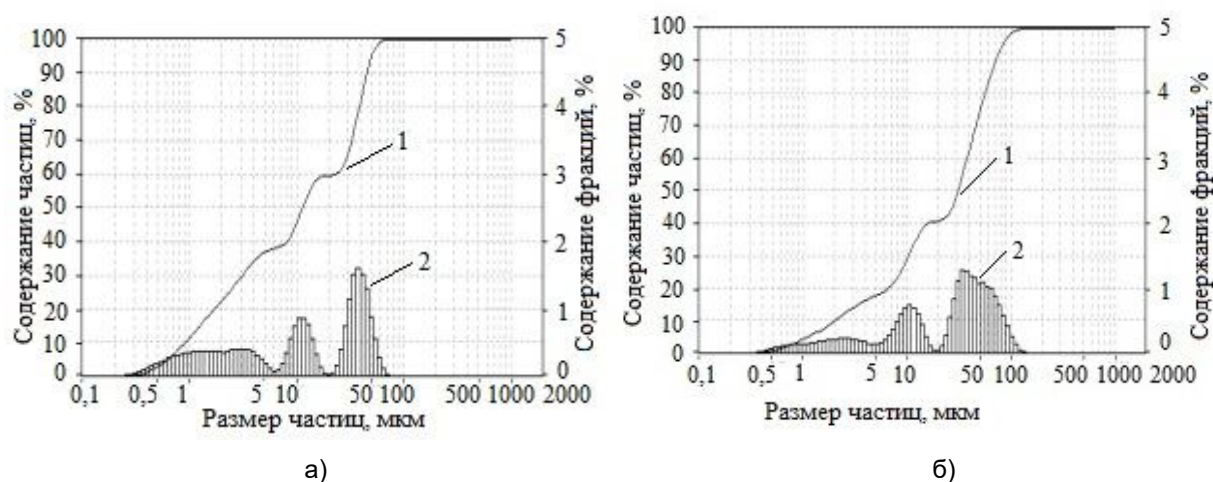


Рис. 5. Гранулометрический состав порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования: а – алюминиевых отходов; б – титановых отходов

Fig. 5. Granulometric composition of powder materials obtained by electroerosion dispersion: а – aluminum waste; б – titanium waste

Исследования гранулометрического состава порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования, показали, что средний размер частиц порошков, полученных из алюминиевых отходов, состав-

ляет 19,08 мкм, а средний размер частиц порошков, полученных из титановых отходов, составляет 33,12 мкм.

Исходя из свойств полученных порошковых материалов, можно сделать вывод, что данные порошковые матери-

алы подходят для изготовления порошковых электродов методом искрового плазменного спекания. Искровое плазменное спекание является наиболее перспективным методом получения разнообразных материалов, который получает все более широкое распространение в мире.

Особенности этого метода консолидации порошковых материалов состоят в том, что нагрев вещества происходит путем пропускания импульсов электрического тока; это позволяет существенно снизить температуру и сократить время спекания по сравнению с обычным спеканием и горячим прессованием.

Выводы

1. Установлено, что наиболее перспективными и промышленно не применяемыми материалами для производства электродов, применяемых при сварке и наплавке деталей, являются порошковые материалы, получаемые методом электроэрозионного диспергирования.

2. Экспериментально установлено, что порошковые материалы, получаемые электроэрозионным диспергирова-

нием алюминиевых и титановых отходов, состоят из частиц сферической и эллиптической формы.

3. Представлены результаты исследования элементного состава порошковых материалов, получаемых электроэрозионным диспергированием алюминиевых и титановых отходов. Показано, что основными элементами порошков, полученных из алюминиевых отходов, являются алюминий и кислород, а основными элементами порошков, полученных из стружки марки ВТ6, являются Ti, Al, O, V, Fe, W и K.

4. Исследования гранулометрического состава порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования, показали, что средний размер частиц порошков, полученных из алюминиевых отходов, составляет 19,08 мкм, а средний размер частиц порошков, полученных из титановых отходов, составляет 33,12 мкм.

5. Установлено, что наиболее перспективным методом для производства электродов, используемых для сварки и наплавки деталей из алюминиевых и титановых сплавов, является метод искрового плазменного спекания.

Список литературы

1. Полянский Ю.В., Тамаров А.П. Электроискровое легирование и последующая лазерная обработка инструмента из быстрорежущих сталей // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 1998. № 2 (3). С. 49-54.

2. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Электроискровое легирование // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2010. № 4 (52). С. 30-32.
3. Сафонов С.В., Смоленцев В.П., Грицюк В.Г. Электроискровое легирование и покрытие металлических изделий // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 11 (212). С. 13-19.
4. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д., Власенко В.Д. Электроискровое легирование поверхностей титановых сплавов // Перспективные материалы. 2006. № 1. С. 79-85.
5. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование твердосплавным электродом в условиях применения нетрадиционных электрических параметров импульса обобщения результатов // Металлообработка. 2005. № 3 (27). С. 21-28.
6. Астапов И.А., Верхотуров А.Д., Козырь А.В. Электроискровое легирование сплава ВК8 карбидами переходных металлов IV-VI групп и металлокерамикой на основе карбида титана // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки. 2009. № 3. С. 64-69.
7. Логинов П.К., Ретюнский О.Ю. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 217 с.
8. Новиков А.Н., Стратулат М.П., Севостьянов А.Л. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей. Орел: ОрелГТУ, 2006. 332 с.
9. Агеева Е.В., Новиков Е.П., Агеев Е.В. Рентгеноструктурный анализ алюминиевого электроэрозионного порошка, полученного в дистиллированной воде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. Т.20. №5 (68). С. 8-13.
10. Ageeva E.V., Ageev E.V., Osminina A.S. Properties and characterizations of powders produced from waste carbides // Журнал нано- и электронной физики. 2013. Т. 5. № 4. С. 04038-1-04038-2.
11. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19-22.
12. Пат. 2612117 РФ. Российская Федерация, МПК В22F 9/14, С22В 7/00, С22В 21/00, В82У 30/00. Способ получения алюминиевого нанопорошка / Агеев Е. В., Новиков Е.П., Агеева Е. В.; заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. № 2015144702; заявл. 19.10.2015; опубл. 02.03.2017, Бюл. № 17.
13. Пат. 2631549 РФ. Российская Федерация, МПК В22F 9/14, С22В 34/12, В23Н 1/00. Способ получения порошка титана методом электроэрозионного диспергирования / Новиков Е.П., Агеев Е.В., Агеева Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. № 2016110017; заявл. 11.11.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 27.

14. Ageeva E. V., Ageev E. V., Karpenko V. Yu. Nanopowder Produced from High-Speed Steel Waste by Electrospark Dispersion in Water // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35, no 3. P. 189–190.

15. Фазовый состав частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутиловом спирте / Е.В., Агеева А.Ю. Алтухов, С.С. Гулидин, Е.В. Агеев, А.А. Горохов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2016. № 1 (18). С. 20-25.

16. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

17. Размерные характеристики бронзового электроэрозионного порошка, полученного в воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Чаплыгин, А.А. Горохов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2016. № 1 (18). С. 30-35.

18. Агеев Е.В., Латыпов Р.А. Получение и исследование заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2014. № 5. С. 50-53.

19. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014. Vol. 55. No. 6. P. 577-580.

Reference

1. Polyanskov Yu. V., Tamarov A. P. Elektroiskrovoe legirovanie i posleduyushchaya lazernaya obrabotka instrumenta iz bystrozrezhushchikh stalei [Electrospark alloying and subsequent laser processing of high-speed steel tools]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ulyanovsk state technical University*, 1998, no. 2 (3), pp. 49-54 (In Russ.)

2. Ivanov I. I., Burumkulov F. H. Elektroiskrovoe legirovanie [Electrospark / In doping]. *Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = Repair. Innovations. Technologies. Modernization*, 2010, no. 4 (52), pp. 30-32 (In Russ.)

3. Safonov S. V., Smolentsev V. P., Gritsyuk V. G. Elektroiskrovoe legirovanie i pokrytie metallicheskih izdelii [Electrospark alloying and coating of metal products]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem = Handbook. Engineering journal with the app*, 2014, no. 11 (212), pp. 13-19. (In Russ.)

4. Mulin Yu. I., Verhoturov A. D., Vlasenko V. D. Elektroiskrovoe legirovanie i pokrytie metallicheskih izdelii [Electrospark alloying of surfaces of titanium alloys]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem = Perspective materials*, 2006, no. 1, pp. 79-85 (In Russ.)
5. Rybalko A.V., Siminel A.V., Sakhin O. Elektroiskrovoe legirovanie tverdosplavnym elektrodom v usloviyakh primeneniya netraditsionnykh elektricheskikh parametrov impul'sa obobshchenie rezul'tatov [Electrospark alloying with a carbide electrode in the conditions of application of unconventional electrical parameters of the pulse generalization of the results]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2005, no. 3 (27), pp. 21-28 (In Russ.)
6. Astapov I. A., Verhoturov A. D., Kozyr A. V. Elektroiskrovoe legirovanie splava VK8 karbidami perekhodnykh metallov IV-VI grupp i metallokeramikoi na osnove karbida titana [Electrospark alloying of the alloy vk8 WITH transition metal carbides IV and VI groups and with metal ceramics based on titanium carbide]. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Bulletin of the Pomor University. Series: Natural Sciences*, 2009, no. 3, pp. 64-69 (In Russ.)
7. Loginov P. K., Retyunsky O. Y. Elektroiskrovoe legirovanie splava VK8 karbidami perekhodnykh metallov IV-VI grupp i metallokeramikoi na osnove karbida titana [Methods and technological processes of restoration of worn parts]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010, 217 p. (In Russ.)
8. Novikov A. N., Stratulat M. P., Sevostyanov A. L. Vosstanovlenie i uprochnenie detalей avtomobilei [Restoration and strengthening of car parts]. Orel, OrelGTU Publ, 2006, 332 p. (In Russ.)
9. Ageeva E. V., Novikov E. P., Ageev E. V. Rentgenostrukturnyi analiz alyuminievogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v distillirovannoi vode [X-ray Diffraction analysis of aluminum electroerosive powder obtained in distilled water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, vol. 20, no. 5 (68), pp. 8-13 (In Russ.)
10. Ageeva E. V., Ageev E. V., Osminina A. S. Properties and characterizations of powders produced from waste carbides. *Zhurnal nano- i elektronnoifiziki = Journal-and-electron Physics*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 04038-1-04038-2.
11. Latypov R. A., Ageev E. V., Ageeva E. V., Novikov E. P. Issledovanie alyuminievogo poroshka, poluchennogo metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya v distillirovannoi vode [Investigation of aluminum powder obtained by the method of electroerosion dispersion in distilled water]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = Materials All. Encyclopedic reference book*, 2016, no. 4, pp. 19-22. (In Russ.)

12. Ageev E. V., Novikov E. P., Ageeva E. V. Sposob polucheniya alyuminievogo nanoporoshka [Method for producing aluminum nanopowder]. Patent RF, no. 2612117, 2017.
13. Novikov E. P., Ageev E. V., Ageeva E. V. Sposob polucheniya poroshka titana metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya [Method for producing titanium powder by electroerosion dispersion]. Patent RF, no. 2631549, 2017.
14. Ageeva E. V., Ageev E. V., Karpenko V. Yu. Nanopowder obtained from high-speed steel waste by electrosark dispersion in water. *Russian Engineering Studies*, 2015, vol. 35, no. 3, pp. 189-190.
15. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Gulidin S.S, Ageev E. V., Gorokhov A. A. Fazovyi sostav chastits poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem splava VK8 v butilovom spirte [Phase composition of powder particles obtained by electroerosive dispersion of THE vk8 alloy in butyl alcohol]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25 (In Russ.)
16. Ageev E. V., Gadlov V.N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tvr-dykh splavov - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoj tekhniki [Powders obtained by electroerosion dispersion of solid alloy waste - a promising material for the restoration of parts of automotive engineering]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.)
17. Ageev E. V., Ageev E. V., Chaplygin.Y., Gorokhov A. Razmernye kharakteristiki bronzovogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v vode [Sizing bronze spark erosion powder obtained in water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 30-35 (In Russ.)
18. Ageev E. V., Latypov R. A. Poluchenie i issledovanie zagotovok tverdogo splava iz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem vol'framsoderzhashchikh otkhodov [Preparation and study of solid alloy blanks from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya. = Proceedings of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy*, 2014, no. 5, pp. 50-53 (In Russ.)
19. Ageev E. V., Latypov R. A. Production and research of carbide blanks from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing waste. *Russian journal of non-ferrous metals*, 2014, vol. 55, is.6, pp. 577-580.

Информация об авторах / Information about the Authors

Латыпов Рашит Абдулхакович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства, ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Российская Федерация
e-mail: latipov46@mail.ru

Rashit A. Latypov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Equipment and Technology of Welding Production, Moscow, Russian Federation
e-mail: latipov46@mail.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Evgeniy V. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Department of Automobiles and Automobile Economy, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Новиков Евгений Петрович, аспирант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: evgeniy-novikov-92@mail.ru

Evgeny P. Novikov, Post-Graduate Student, Department of Automobiles and Automobile Economy, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: evgeniy-novikov-92@mail.ru

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-33-43>

Исследование вариантов реализации серий прыжков при преодолении прыгающим роботом лестничного пролета

Л.Ю. Ворочаева ¹✉, С.И. Савин ², А.В. Мальчиков ¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

² Университет Иннополис, ул. Университетская, д. 1, г. Иннополис, 420500, Российская Федерация

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Данная работа посвящена вопросам преодоления прыгающим роботом лестничного пролета при движении по нему вверх. При этом важно совершать прыжки с такой длиной и высотой, которая позволяет преодолеть препятствие с минимально затрачиваемыми энергией и временем. Поэтому в рамках статьи необходимо определить оптимальный вариант реализации серии прыжков для преодоления лестничного пролета по двум ранее указанным критериям.

Методы. Для исследования движения робота по лестничному пролету используются численные методы моделирования в специально разработанном программном комплексе. Для описания контактного взаимодействия устройства со ступенями пролета применяются методы теории удара, для моделирования разгона и полета устройства – методы динамики многомассовых систем.

Результаты. В рамках работы проведено численное моделирование движения устройства при движении его сериями прыжков по лестничному пролету, в результате которого получены зависимости затрачиваемых на преодоление пролета энергии и времени от варианта движения (серии прыжков), а также построены оптимизационные диаграммы. Данные диаграммы позволяют сгруппировать варианты серий прыжков по областям от I до VII по мере удаления от оптимальной области I. Также установлено, что независимо от числа прыжков оптимальным вариантом является тот, при котором один прыжок осуществляется на максимально возможное число ступеней, а во время каждого из остальных происходит запрыгивание на одну ступень.

Заключение. Полученные в данной работе результаты найдут применение при разработке системы управления движением прыгающего робота, позволяющей устройству реализовывать преодоление лестничных пролетов оптимальным, с точки зрения затрачиваемых энергии и времени, вариантом.

Ключевые слова: прыгающий робот; лестничный пролет; модель контактного взаимодействия; оптимизация; энергия; время перепрыгивания.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-31-00075.

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

Для цитирования: Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В. Исследование вариантов реализации серий прыжков при преодолении прыгающим роботом лестничного пролета // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 33-43. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-33-43>.

Статья поступила в редакцию 10.04.2019

Статья подписана в печать 27.05.2019

© Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В., 2019

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(3): 33-43

The Research of Jumps' Implementation Options in Overcoming Ladder Flight by the Jumping Robot

Lyudmila Yu. Vorochaeva¹, Sergey I. Savin², Andrey V. Malchikov¹

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

² Innopolis University, 1, Universitetskaya str., Innopolis, 420500, Russian Federation

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. This article is devoted to overcoming ladder flight by the jumping robot when moving up. At the same time it is important to make jumps with such length and height which allows overcoming an obstacle with minimum energy and time spent. So it is necessary to determine an optimal variant of jumps implementation for overcoming ladder flight by two specified criteria.

Methods. Numerical methods of modeling in specially developed program complex are used to study movement of the robot. Hit theory is used to describe device contact interaction with flight's steps. Methods of multimass system dynamics is used for dispersal and flight modeling.

Results. Numerical modeling of device's movement at jumps series on ladder flight is done. Energy and time dependences spent for overcoming flights are received. Optimizing charts are also constructed. These charts allow to group options of jumps series from I to VII zones in the process of removal from optimum zone I. It is also stated that optimal variant is at which one jump is carried out on the greatest possible number of steps irrespectively from number of jumps. It is also stated that there is a jump on one step during the other jumps.

Conclusion. The study results can be applied at the development of jumping robot's movement system. It helps the device to realize overcoming ladder flights optimum from the point of view of spent energy and time.

Keywords: jumping robot; ladder flight; model of contact interaction; optimization; energy; jumping time.

Acknowledgements: the Work was done in the framework of RFBR project № 18-31-00075.

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

For citation: Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Malchikov A.V. The Research of Jumps' Implementation Options in Overcoming Ladder Flight by the Jumping Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 33-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-33-43>.

Received 10.04.2019

Accepted 27.05.2019

Введение

Многие работы современных исследователей посвящены вопросам преодоления прыгающими роботами различных по форме и размерам препятствий [1-3] при движении их по пересе-

ченной местности. Так в статье [1] описывается миниатюрный комбинированный колесно-прыгающий робот, который для перемещения по достаточно ровной местности использует колеса, а для преодоления препятствия, суще-

ственно превышающего его размеры, задействует прыжковый механизм. В качестве основных областей применения такого робота авторы называют экологический мониторинг, спасательные и поисковые работы, военное наблюдение. В [2] рассматривается другой миниатюрный прыгающий робот, который может совершать прыжки для преодоления препятствий, высота которых в 2 раза превышает размеры устройства. В работе [3] предложена стратегия планирования траектории прыжка одного четырехзвенного робота через препятствие, корректность работы данной стратегии подтверждена численными экспериментами и опытным путем.

В этой статье принято решение остановиться на исследовании преодоления прыгающим роботом лестничного пролета при движении по нему вверх и провести численные эксперименты, позволяющие установить оптимальный вариант его преодоления с точки зрения затрачиваемых при этом энергии и времени.

Материалы и методы решения задачи

Преодоление лестничного пролета

Будем рассматривать движение прыгающего робота в вертикальной плоскости Oxy вверх по лестничному пролету, число ступеней в котором равно n (рис. 1). Расчетная схема робота и принципы реализации им прыжка описаны в статьях [4-6].

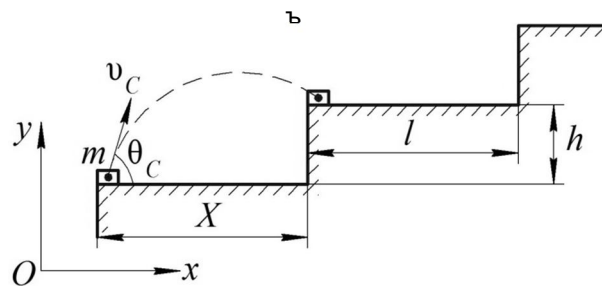


Рис. 1. Схема преодоления прыгающим роботом лестничного пролета

Fig. 1. Scheme of the jumping robot overcome flights of stairs

Пусть длина и высота каждой ступени равны l и h соответственно. Будем считать, что робот представляет собой прямоугольник с размерами l_r и h_r и массой m , центр масс совпадает с центром симметрии прямоугольника (точкой C , на рис. 1 не показана). Устройство для совершения прыжка приобретает скорость v_C , являющуюся скоростью отрыва устройства от поверхности, вектор скорости направлен под углом θ_C к горизонту [5]. Перед каждым прыжком робот располагается на расстоянии $X=l$ от ступени.

Преодоление лестничного пролета может быть реализовано с использованием различного числа прыжков p от 1 до равного числу ступеней:

$$p \in [p_{\min}, p_{\max}], \quad p_{\min} = 1, \quad p_{\max} = n. \quad (1)$$

Число перепрыгиваемых за один прыжок ступеней при этом

$$N_i \in [N_{\min}, N_{\max}], \quad N_{\min} = 1$$

$$\text{при } p_{\max}, \quad N_{\max} = n \quad \text{при } p_{\min}. \quad (2)$$

Распределение преодолеваемых ступеней по прыжкам (вариант реализации серии прыжков) можно описать следующим образом:

$$N_1 = (a_{\min} + (k-1)), k \in [1, k_1^*],$$

$$\dots$$

$$N_i = (a_{\min} + (k-1)) k \in [N_{i-1}, k_i^*] \quad (3)$$

$$\text{при } N_{i-1} \in [N_{(i-1)\min}, N_{(i-1)\max}],$$

...

$$N_p = n - \sum N_1 \dots N_{p-1} \text{ при } N_p \geq N_{p-1},$$

где $a_{\min}=1$ – минимальное число преодолеваемых за прыжок ступеней,

$$k_1^* = \begin{cases} \min(N_p), \sum n_1 \dots n_p \bmod(p) = 0, \\ \min(N_p - 1), \sum n_1 \dots n_p \bmod(p) \neq 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$k_i^* = \begin{cases} \min(N_p), \sum n_1 \dots n_p \bmod(p-i+1) = 0, \\ \min(N_p - 1), \sum n_1 \dots n_p \bmod(p-i+1) \neq 0, \end{cases} \quad (5)$$

$\min(N_p)$ – наименьшее значение числа ступеней, преодолеваемых за последний прыжок.

В соответствии с данной формулой число N_1 перепрыгиваемых за первый прыжок ступеней может изменяться от 1 до $\min(N_p)$ или $\min(N_p-1)$ в зависимости от выполнения условия. Число N_i перепрыгиваемых за i -ый прыжок ступеней может варьироваться от 1 до $\min(N_p)$ или $\min(N_p-1)$ при каждом значении N_{i-1} перепрыгиваемых за предыдущий прыжок ступеней. Число N_p перепрыгиваемых за последний прыжок ступеней всегда представляет собой разность между числом ступеней в лестничном пролете и числом уже перепрыгнутых за предыдущие прыжки ступеней. Причем это число не может

быть меньше перепрыгнутых за предыдущий прыжок ступеней.

Рассмотрим использование этой формулы на примере $n=12$ ступеней, число прыжков может быть равным $p \in [1, 12]$, var – вариант реализации серии прыжков. Под вариантом преодоления лестничного пролета понимается серия прыжков, представляющая собой комбинацию числа перепрыгиваемых ступеней и реализуемая при каждом возможном числе прыжков от одного до равного числу ступеней в пролете.

при $p=1$, var=1: $N_1=12$,

при $p=2$, var=1-6, N_1/N_2 : 1/11, 2/10, 3/9, 4/8, 5/7, 6/6,

при $p=3$, var=1-12: $N_1/N_2/N_3=1/1/10$, 1/2/9, 1/3/8, 1/4/7, 1/5/6, 2/2/8, 2/3/7, 2/4/6, 2/5/5, 3/3/6, 3/4/5, 4/4/4 и т.д.

Для осуществления каждого прыжка робот затрачивает энергию W_i

$$W_i = m v_{Ci}^2 / 2, i = 1..p, \quad (6)$$

и время T_i , являющееся временем с момента отрыва устройства от поверхности до момента завершения прыжка.

Тогда для преодоления лестничного пролета роботу потребуется энергия W

$$W = \sum_{i=1}^p W_i \quad (7)$$

и время T_{vs}

$$T_{vs} = T + T_r p, \quad (8)$$

где $T = \sum_{i=1}^p T_i$ (9) – время, затрачиваемое роботом на прыжки, T_r – время

подготовки робота к прыжку (время позиционирования и взведения разгонного модуля).

Критериями оптимизации при преодолении лестничного пролета будем считать энергию W и время T_{vs} :

$$p, N = \min(W, T_{vs}). \quad (10)$$

Моделирование контактного взаимодействия робота со ступенью

Разгон робота перед прыжком описан в работе [5], а полет – в статье [4]. Здесь остановимся на рассмотрении вопросов моделирования взаимодействия прыгающего робота со ступенями лестничного пролета при приземлении. Для этого могут быть использованы различные методы. Часто применяются т.н. linear complementarity constraints, представляющие собой условия, накладываемые на переменные состояния или обобщенные координаты, заданные в виде системы неравенств [7]. Задачи с такими связями называют LCP (от англ. linear complementarity problem) [8]. Альтернативным подходом является введение виртуальных пружин, позволяющих моделировать контакт и ударные взаимодействия распределенными во времени.

В данной работе предлагается использовать геометрические и кинематические характеристики контактирующих тел для моделирования их движения после удара. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Пусть выпуклое препятствие описывается системой линейных нера-

венств, что всегда можно осуществить, используя inverse vertex enumeration алгоритм [9]:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} < \mathbf{b}, \quad (11)$$

где $\mathbf{A}$ и $\mathbf{b}$ – матрица и вектор линейного представления препятствия, а $\mathbf{x}$ – произвольная точка внутри препятствия.

Тогда пусть точка $\mathbf{r}_E$ принадлежит роботу и для неё удовлетворяется условие (11). Это означает, что точка $\mathbf{r}_E$ находится внутри многогранника, описанного системой (11). Найдем индекс грани, наиболее близкой к $\mathbf{r}_E$:

$$I = \arg \max_I ((\mathbf{A}\mathbf{r}_E - \mathbf{b})_I), \quad (12)$$

где $(\cdot)_I$ – взятие I -ого элемента вектора или I -ой строки матрицы.

В таком случае нормаль $\mathbf{n}_I$ к найденной грани может быть получена как

$$\mathbf{n}_I = \frac{(\mathbf{A}\mathbf{r}_E - \mathbf{b})_I}{\|(\mathbf{A}\mathbf{r}_E - \mathbf{b})_I\|}. \quad (13)$$

Далее для простоты будем рассматривать задачу на плоскости. Для двумерного случая тангенциальный вектор к грани препятствия может быть найден следующим образом:

$$\boldsymbol{\tau}_I = \mathbf{T}_\perp \mathbf{n}_I, \quad \mathbf{T}_\perp = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Указанные действия позволяют отыскать нормаль и тангенциальный вектор грани препятствия, которую нарушил робот. Следующей задачей является внесение изменений в кинематику ро-

бота таким образом, чтобы тот вышел из пересечения с препятствием.

Зададим вектор $\mathbf{r}_{CE}$ от центра масс робота C к точке E :

$$\mathbf{r}_{CE} = \mathbf{r}_E - \mathbf{r}_C. \quad (15)$$

С его помощью получим скорость точки $\mathbf{r}_E$ до удара:

$$\dot{\mathbf{r}}_E^- = \dot{\mathbf{r}}_C^- + \omega^- \mathbf{T}_\perp \mathbf{r}_{CE}, \quad (16)$$

где ω – величина угловой скорости робота, верхний индекс $(\cdot)^-$ в данном случае означает «до удара».

После удара потребуем, чтобы скорость точки $\mathbf{r}_E$ была таковой:

$$\dot{\mathbf{r}}_E^+ = \dot{\mathbf{r}}_{E,n}^+ + \dot{\mathbf{r}}_{E,\tau}^+, \quad (17)$$

где $\dot{\mathbf{r}}_{E,n}^+$ – нормальная составляющая скорости после удара, а $\dot{\mathbf{r}}_{E,\tau}^+$ – тангенциальная составляющая, верхний индекс $(\cdot)^+$ в данном случае означает «после удара»:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_{E,n}^+ &= \mu_n (\dot{\mathbf{r}}_E^- \cdot \mathbf{n}_1) \mathbf{n}_1, \\ \dot{\mathbf{r}}_{E,\tau}^+ &= \mu_\tau (\dot{\mathbf{r}}_E^- \cdot \boldsymbol{\tau}_1) \boldsymbol{\tau}_1, \end{aligned} \quad (18)$$

где μ_n и μ_τ – коэффициенты предлагаемой модели контактного взаимодействия, определяющие величину отскока и диссипации энергии.

Последним шагом является вычисление новых значений скорости центра масс робота и его угловой скорости. Для этого записывается и решается следующая линейная система:

$$\dot{\mathbf{r}}_C^+ + \omega^+ \mathbf{T}_\perp \mathbf{r}_{CE} = \dot{\mathbf{r}}_E^+, \quad (19)$$

где $\dot{\mathbf{r}}_C^+$ и ω^+ – искомые параметры. Эта система может быть решена как

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_C^+ \\ \dot{y}_C^+ \\ \omega^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{CE} \\ 0 & 1 & x_{CE} \end{bmatrix}^\# \begin{bmatrix} \dot{x}_E^+ \\ \dot{y}_E^+ \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где $(\cdot)^\#$ означает псевдообращение Мура-Пенроуза.

Результаты и их обсуждение

Моделирование преодоления лестничного пролета

В данном разделе остановимся на рассмотрении вопроса преодоления лестничного пролета из $n=12$ ступеней, длина и высота которых в безразмерных параметрах равны $l=h=0,2$, сериями прыжков, где $p \in [1, 12]$.

Для выявления взаимосвязи энергии, затрачиваемой на прыжки, и реализуемого варианта серии прыжков, введем понятие средней энергии W_{sr} , вычисляемой по формуле

$$W_{sr} = \frac{\sum W}{\text{var}} \quad (21)$$

при каждом значении числа прыжков p .

На рис. 2 в качестве примера представлены диаграммы затрачиваемых энергии W , времени T и средней энергии W_{sr} от варианта реализации серии прыжков при $p=4$.

Анализируя данные графики, можно сделать вывод о том, что затрачиваемая на серию прыжков энергия W не зависит в явном виде от варианта реа-

лизации прыжков и носит случайный характер. Время T , затрачиваемое на прыжки, возрастает по мере увеличения значения варианта серии прыжков, наименьшее время перепрыгивания наблюдается при $\text{var}=1$. С точки зрения комбинирования числа перепрыгиваемых ступеней это означает, что за меньшее время лестничный пролет можно перепрыгнуть, совершая один прыжок на

максимально возможное при данном значении p число ступеней, а все остальные прыжки при этом происходят на одну ступень.

Наибольшее время T потребуется в случае, когда число перепрыгиваемых за каждый прыжок ступеней примерно одинаковое, что можно описать формулой:

$$T = \begin{cases} T_{\min}, & \text{если } (N_1 = N_2 = \dots = N_{p-1} = 1), \\ T_{\max}, & \text{если } (N_1 \cong N_2 \cong \dots \cong N_p). \end{cases} \quad (22)$$

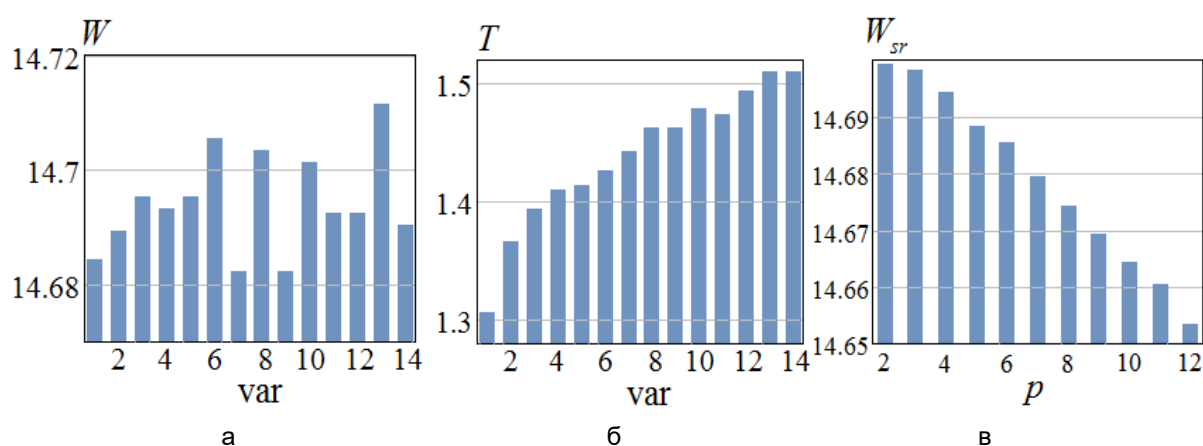


Рис. 2. Графики зависимостей: а – $W(\text{var})$, б – $T(\text{var})$ при $p=4$, в – $W_{sr}(p)$

Fig. 2. Graphs: а – $W(\text{var})$, б – $T(\text{var})$ at $p=4$, в – $W_{sr}(p)$

Следует отметить, что зависимости $T_{vs}(\text{var})$ имеют характер, аналогичный ранее представленным закономерностям $T(\text{var})$ и в материалах статьи не проиллюстрированы.

На рис. 2, в показана диаграмма W_{sr} в зависимости от числа прыжков. По данной диаграмме видно, что средняя энергия убывает по мере увеличения p по закону, близкому к прямолинейному.

Полученные закономерности позволяют перейти к определению оптимального с точки зрения затрачиваемых

энергии W и времени T_{vs} варианта реализации серии прыжков.

Определение оптимального варианта реализации серии прыжков

Для определения оптимального варианта осуществления серии прыжков при каждом значении числа прыжков $p \in [2, 10]$ (при $p=1, 11, 12$ число вариантов $\text{var}=1$, что не рассматривается в данной работе) построены диаграммы $W(T_{vs})$, приведенные на рис. 3.

На данных диаграммах красными точками отмечены значения затрачива-

емой энергии W при каждом значении T_{vs} , горизонтальная пунктирная линия соответствует среднему значению энергии W_{sr} . Также на диаграммах построены области I – VIII распределения значений $W(T_{vs})$, область I – оптимальное сочетание величин W и T_{vs} . Затем по мере увеличения номера области значения $W(T_{vs})$ удаляются от оптимальных. Число областей варьируется в зависимости от числа p прыжков и возможных

при этом вариантов var . Так при $p=10$ существует всего $var=2$ вариантов перепрыгивания лестничного пролета, число областей при этом равно двум (это минимальное число областей), а при $p=5$ ($var=13$) выделено максимальное число областей – восемь.

Взаимосвязь между вариантом реализации серии прыжков и областью параметров представлена в таблице.

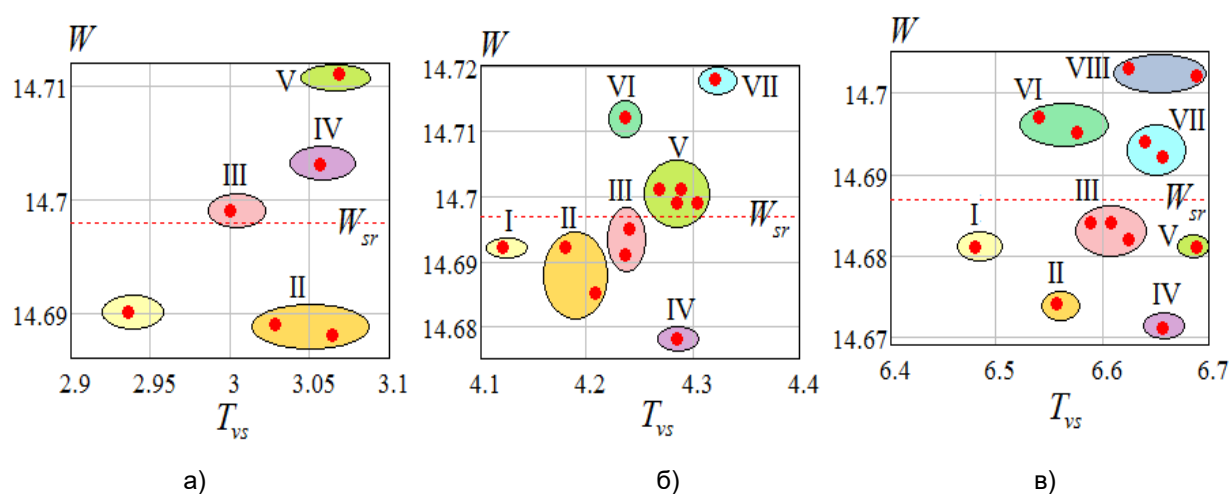


Рис. 3. Оптимизационные диаграммы $W(T_{vs})$: а – $p=2$, б – $p=3$, в – $p=5$

Fig. 3. Optimization diagrams $W(T_{vs})$: а – $p=2$, б – $p=3$, в – $p=5$

Области параметров W и T_{vs} в зависимости от p и var

Parameter areas W and T_{vs} depending at p and var

var	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p=2$	I	III	II	IV	V	II	-	-	-	-	-	-	-	-
$p=3$	I	II	II	VII	III	III	VI	VI	V	IV	IV	VII	-	-
$p=4$	I	II	III	III	III	VI	IV	VI	IV	VI	V	V	VII	V
$p=5$	I	VI	II	VI	III	III	VIII	III	VII	VII	IV	VIII	V	-
$p=6$	I	II	II	VII	V	V	III	VII	IV	VI	VII	-	-	-
$p=7$	I	III	III	V	II	IV	VI	-	-	-	-	-	-	-
$p=8$	I	IV	II	III	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$p=9$	I	II	III	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$p=10$	I	II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

По данной таблице видно, что оптимальным всегда является вариант $var=1$ реализации серии прыжков, при котором один прыжок осуществляется на максимально возможное число ступеней, а все остальные прыжки при этом происходят на одну ступень.

Распределение областей II – VIII по вариантам var имеет неявный характер.

Выводы

Статья посвящена исследованию вариантов реализации прыгающим роботом серий прыжков при преодолении лестничного пролета (при движении по нему вверх). Варианты отличаются числом прыжков, за которые преодолевается лестничный пролет, и распределением

ступеней пролета по прыжкам. Проведено численное исследование движения устройства, в результате которого установлено, что независимо от числа прыжков оптимальным вариантом является тот, при котором один прыжок осуществляется на максимально возможное число ступеней, а во время каждого из остальных происходит запрыгивание на одну ступень. В качестве критериев оптимизации использовались затрачиваемые на преодоление лестничного пролета энергия и время. Также построены оптимизационные диаграммы по двум ранее введенным критериям (затрачиваемым энергии и времени), на которых выделены области от I до VIII, I – область оптимальных значений.

Список литературы

1. Zhao J., Yan W., Xi N., Mutka M.W., Xiao L. A miniature 25 grams running and jumping robot // Robotics and Automation (ICRA): Proc. IEEE Intern. Conf., Hong Kong, China, 2014. P. 5115-5120.
2. Lambrecht B. G. A., Horschler A. D., Quinn R. D. A small, insect-inspired robot that runs and jumps // Robotics and Automation (ICRA): Proc. IEEE Intern. Conf., Barcelona, Spain, 2005. P. 1240-1245.
3. Xu Z., Lü T., Ling F. Trajectory planning of jumping over obstacles for hopping robot // J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2008. Vol. 30. No. 4. P. 327-334.
4. Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Савин С.И. Исследование вопросов управления ориентацией колесного прыгающего робота в полете // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. № 4. С. 236-243.
5. Vorochaeva L., Savin S. Study of the Acceleration Modes of a Jumping Robot for Two Cases of Realisation // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Conf., Omsk, Russia, 2018. P. 1–6.

6. Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Савин С.И. Определение диапазонов допустимых значений геометрических параметров колесного прыгающего робота // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 1(76). С. 76-84. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-1-76-84>.

7. Anitescu M., Potra, F.A. Formulating dynamic multi-rigid-body contact problems with friction as solvable linear complementarity problems // Nonlinear Dynamics. 1997. Vol. 14(3). P. 231-247.

8. Cottle R.W. Linear complementarity problem // Springer US. 2009. P. 1873-1878.

9. Avis D., Fukuda K. A pivoting algorithm for convex hulls and vertex enumeration of arrangements and polyhedral // Discrete & Computational Geometry. 1992. Vol. 8(3). P. 295-313.

Reference

1. Zhao J., Yan W., Xi N., Mutka M.W., Xiao L. A miniature 25 grams running and jumping robot. Robotics and Automation (ICRA). Proc. IEEE Intern. Conf. Hong Kong, China, 2014, pp. 5115-5120.

2. Lambrecht B. G. A., Horchler A. D., Quinn R. D. A small, insect-inspired robot that runs and jumps. Robotics and Automation (ICRA). Proc. IEEE Intern. Conf., Barcelona, Spain, 2005, pp. 1240-1245.

3. Xu Z., Lü T., Ling F. Trajectory planning of jumping over obstacles for hopping robot. *J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2008, vol. 30, no. 4, pp. 327-334.

4. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Savin S.I. Issledovanie voprosov upravleniya orientatsiei kolesnogo prygayushchego robota v polete [Study of Orientation Control for a Wheeled Jumping Robot in the Flight Phase of Motion]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie = Mechatronics, automation, control*, 2019, no.4, pp. 236-243 (In Russ.).

5. Vorochaeva L., Savin S. Study of the Acceleration Modes of a Jumping Robot for Two Cases of Realisation. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Conf. Omsk, Russia, 2018, pp. 1–6.

6. Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Savin S.I. Opredelenie diapazonov dopustimykh znachenii geometricheskikh parametrov kolesnogo prygayushchego robota [Ranges of admissible values of geometric parameters of a wheeled jumping robot]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 1(76), pp. 76-84 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-1-76-84>.

7. Animescu M., Potra F.A. Formulating dynamic multi-rigid-body contact problems with friction as solvable linear complementarity problems. *Nonlinear Dynamics*, 1997, vol. 14(3), pp. 231-247.
8. Cottle R.W. Linear complementarity problem. Springer US, 2009, pp. 1873-1878.
9. Avis D., Fukuda K. A pivoting algorithm for convex hulls and vertex enumeration of arrangements and polyhedral. *Discrete & Computational Geometry*, 1992, vol. 8(3), pp. 295-313.
-

Информация об авторах / Information about the Authors

Людмила Юрьевна Ворочаева, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mila180888@yandex.ru

Lyudmila Yu. Vorochaeva, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Mechanics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: mila180888@yandex.ru

Сергей Игоревич Савин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования, Университет Иннополис, г. Иннополис, Российская Федерация, e-mail: s.savin@innopolis.ru

Sergey I. Savin, Candidate of Engineering Science, Senior Research Associate of Mechatronics, Management and Wireframing Laboratory, Innopolis University, Innopolis, Russian Federation
e-mail: s.savin@innopolis.ru

Андрей Васильевич Мальчиков, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknnp@gmail.com

Andrey V. Malchikov, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Mechanics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: zveroknnp@gmail.com

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-44-53>

Применение метода конечных элементов при расчете сварного корпуса гидроамортизатора

А. А. Котельников¹ ✉, Я. Э. Родионов¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: kotelnikov@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается применение различных методов расчёта напряжённо-деформированного состояния сварного корпуса гидроамортизатора. Целью исследования является установление оптимальных методов расчёта напряжённо-деформированного состояния сварных конструкций, работающих под давлением, обеспечивающих возможность рационального проектирования изделий при минимальном расходе материала с заданным коэффициентом запаса прочности.

Методы. В настоящее время нет достоверных методов расчёта, отражающих действительную работу сварных конструкций под избыточным давлением.

Расчёт на прочность сварных конструкций методом сопротивления материалов, особенно для конструкций, работающих под избыточным давлением, предусматривает ряд допущений: 1 гипотеза плоских сечений; 2 гипотеза одноосных собственных напряжений; 3 гипотеза линейных источников нагрева и предельного теплового состояния; 4 ограничения в отношении свойств металлов; 5 условная зависимость предела текучести от температуры.

Для анализа напряжений и деформаций в сварных швах в последнее время стало возможным использовать средства вычислительной техники, например программу Solid Works (приложение Solid Works Simulation), программу UGS NX (приложение NX Nastran), программу КОМПАС-3D (приложение APM FEM).

Результаты. Расчёт методом сопротивления материалов по ГОСТу 14249-89 отличается от результатов расчёта методами конечных элементов. При увеличении давления внутри корпуса гидроамортизатора наблюдается увеличение разности напряжений в расчётах методами конечных элементов и методом сопротивления материалов. При внутреннем давлении более 11 МПа разница достигает почти 50%. Этот факт необходимо учитывать при проектировании подобных конструкций.

Заключение. Совместное использование различных методов расчёта напряжённо - деформированного состояния сварного корпуса позволяет рационально спроектировать изделие при минимальном расходе материала с заданным коэффициентом запаса прочности [1].

Ключевые слова: метод конечных элементов; допускаемые напряжения; сварные конструкции.

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

Для цитирования: Котельников А. А., Родионов Я. Э. Применение метода конечных элементов при расчете сварного корпуса гидроамортизатора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 44-53. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-44-53>.

Статья поступила в редакцию 20.03.2019

Статья подписана в печать 29.04.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-44-53>

Application of a Finite Element Method in Welded Shell Calculation of Hydraulic Shock-Absorber

Anatoliy A. Kotelnikov ✉¹, Yaroslav E. Rodionov¹

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

✉ e-mail: kotelnikov@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The article describes application of various calculation methods of intense deformed condition of welded shell of hydraulic shock-absorber.

The purpose of the study is to find optimum calculation methods of the intense deformed state of welded structures working under pressure, providing a possibility of structure rational design at minimum material expenses with the given durability safety factor.

Methods. There are no reliable calculation methods reflecting operations of welded structures under excessive pressure. Calculation on durability of welded structures by resistance method has a number of assumptions especially for the constructions operating under excessive pressure. The assumptions are 1. hypothesis of flat sections; 2. hypothesis of monoaxial tension; 3. hypothesis of linear heating sources and limit thermal state; 4. restrictions on metal properties; 5. conditional dependence of fluidity limit on temperature.

It is possible to use SolidWorks (SolidWorksSimulation application) for stress and deformation analysis in weld joints, the UGSNX program (NXNastran application), the KOMPAS-3D program (APMFEM application).

Results. Calculations by material resistance method in accordance with State Standard 14249-89 differ from calculation results in finite element methods. There is tension increase difference in calculations by finite element methods and by resistance materials method at pressure increase in the shell of hydraulic shock-absorber.

The difference is nearly 50% with an internal pressure more than 11 MPa. This fact has to be considered at design of similar structures.

Conclusion. The use of various calculation methods of intense - deformation state of welded shell allows to design a product at minimum material expenses with the set durability safety factor [1].

Keywords: finite element methods; allowed tension; welded structures.

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

For citation: Kotelnikov A. A., Rodionov Ya. E. Application of a Finite Element Method in Welded Shell Calculation of Hydraulic Shock-Absorber. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 44-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-44-53>.

Received 20.03.2019

Accepted 29.04.2019

Введение

Основное требование к сварной конструкции заключается в том, что значения напряжений от реального нагружения должны быть меньше допускаемых напряжений.

Расчёт на прочность сварных конструкций методом сопротивления материалов, особенно для конструкций, работающих под избыточным давлением, предусматривает ряд допущений: 1 – гипотеза плоских сечений; 2 – гипотеза одноосных собственных напряжений; 3 – гипотеза линейных источников нагрева и предельного теплового состояния; 4 – ограничения в отношении свойств металлов; 5 – условная зависимость предела текучести от температуры.

Материалы и методы решения задачи

1. Расчет на прочность методом сопротивления материалов сварного корпуса гидроамортизатора по ГОСТ 14249-89 [2]

Допускаемое напряжение $[\sigma]$ при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов, работающих при статических однократных нагрузках, определяют:

$$[\sigma] = \min \left(\frac{\sigma_T}{n_T}; \frac{\sigma_B}{n_B} \right), \quad (1)$$

где $\sigma_T = 230$ МПа – предел текучести стали ВСт3;

$\sigma_B = 460$ МПа – предел выносливости стали ВСт3;

$n_T = 1,5$ – коэффициент запаса;

$n_B = 3,0$ – коэффициент запаса.

Таким образом, допускаемое напряжение $[\sigma] = 154$ МПа.

Согласно ГОСТ 14249-89 отдельно рассчитываем толщину стенки цилиндра гидроамортизатора. Примем, что толщина стенки цилиндра гарантирована и равна 3 мм. Тогда предельное давление рассчитывается по формуле

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p s k}{D + s}, \quad (2)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 154 \cdot 0,9 \cdot 3 \cdot 0,9}{64 + 3} = 11,17 \text{ МПа},$$

где $\varphi_p = 0,9$ – коэффициент формы сварного шва;

$D = 64$ мм – внутренний диаметр цилиндра;

$s = 3$ мм – толщина стенки цилиндра;

$k = 0,9$ – коэффициент, учитывающий наличие отверстия в цилиндре.

$[\sigma] = 154$ МПа – допускаемое напряжение.

Отсюда, допускаемое давление $[p] = 11,17$ МПа.

Напряжения, возникающие в цилиндре при нагружении, вычисляются по формуле

$$\sigma = \frac{p \left(\frac{D}{s} + 1 \right)}{2 \varphi_p k}, \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1,519875 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1 \right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 20,95 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{2,0265 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1 \right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 27,94 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{8,106 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1 \right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 111,75 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{8.612625 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1\right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 118,73 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{9.11925 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1\right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 125,72 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{10.1325 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1\right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 139,69 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{11.14575 \cdot \left(\frac{64}{3} + 1\right)}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 153,66 \text{ МПа},$$

где p – давление, прикладываемое к цилиндру.

Результаты зависимости напряжений в цилиндре от внутреннего давления представлены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость напряжений в цилиндре от внутреннего давления

Table 1

The dependence of the stresses in the cylinder from internal pressure

Давление, МПа	1.519875	2.0265	8.106	8.612625	9.11925	10.1325	11.14575
Напряжение, МПа	20,95	27,94	111,75	118,73	125,72	139,69	153,66

2. Анализ напряженно-деформированного состояния корпуса гидроамортизатора решателями: NX Nastran, SolidWorks Simulation и APM FEM [3,4]

Для того, чтобы анализ был достоверным, были созданы трехмерные модели гидроамортизатора [5, 6, 7] со сварными швами, специальным вращателем для закрепления гидроамортизатора в каждой из программ. Во всех трех случаях была применена тетраэдральная сетка с размером конечного элемента равным 5 мм и фиксированное крепление гидроамортизатора за проушину.

Расчет в APM FEM [4, 5, 6] показал, что максимальные напряжения возникают в стенке цилиндра гидроамортизатора со стороны отверстия (рис. 2).

Значение максимальных напряжений в центральной зоне представлено в

таблице 2. В краевых сечениях гидроамортизатора напряжения значительно ниже (например, при давлении 1.519875 МПа не превышают 4,545 МПа).

Расчет в SolidWorks Simulation[8-11] также показал, что максимальное напряжение в корпусе гидроамортизатора испытывают стенки цилиндра, однако значения напряжений значительно превышают те, которые были получены в APM FEM.

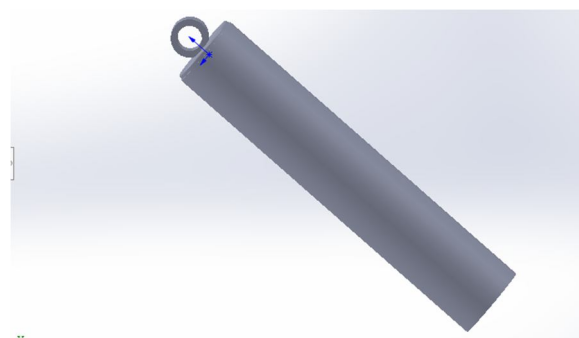


Рис. 1. Трехмерная модель гидроамортизатора

Fig. 1. Three-dimensional model of hydraulic shock absorber

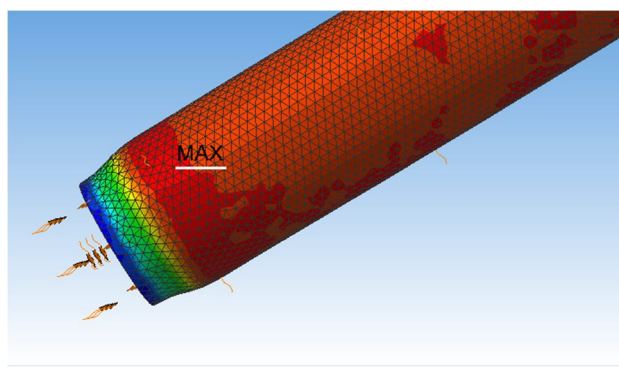


Рис. 2. Максимальное напряжение при расчете в APM FEM

Fig. 2. Maximum voltage when calculated in APM FEM

Таблица 2

Зависимость напряжения в центральной зоне корпуса от внутреннего давления
при расчёте в APM FEM

Table 2

Dependence of the voltage in the Central zone of the housing on the internal
pressure in the calculation of APM FEM

Давление, Мпа	1.519875	2.0265	8.106	8.612625	9.11925	10.1325	11.14575
Напряжение в цилиндре, Мпа	36,35	48,46	193,9	206	218,1	242,4	266,6

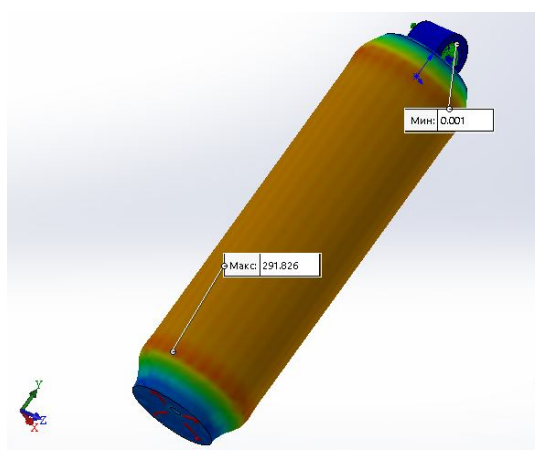


Рис. 3. Распределение напряжений при расчёте в программе SolidWorks Simulation

Fig. 3. Stress distribution in SolidWorks Simulation

Таблица 3

Зависимость напряжения в корпусе гидроамортизатора от внутреннего давления при расчёте в программе SolidWorks Simulation

Table 3

Dependence of the voltage in the body of the hydraulic shock absorber on the internal pressure in the calculation program SolidWorks Simulation

Давление, МПа	1.519875	2.0265	8.106	8.612625	9.11925	10.1325	11.14575
Напряжение в цилиндре, МПа	39,785	53,046	212,237	225,502	238,767	265,297	291,826

Распределение напряжений при расчете в NX Nastran совпадает с распределением напряжений, которое было получено в SolidWorks Simulation. Зависимость значений напряжения от давления в гидроамортизаторе представлена в таблице 4.

Расчет в NX Nastran [4,7-10] также показал, что максимальное напряжение в гидроамортизаторе испытывают стенки цилиндра, однако значения напря-

жений превышают те, которые были получены в APM FEM.

3. Сравнительный анализ результатов расчета по ГОСТ 14249-89 и методом конечных элементов

На рис. 5 представлены зависимости напряжений от прикладываемого к корпусу гидроамортизатора внутреннего давления, полученные при расчете по ГОСТ 14249-89 и методом конечных элементов в различных программах.

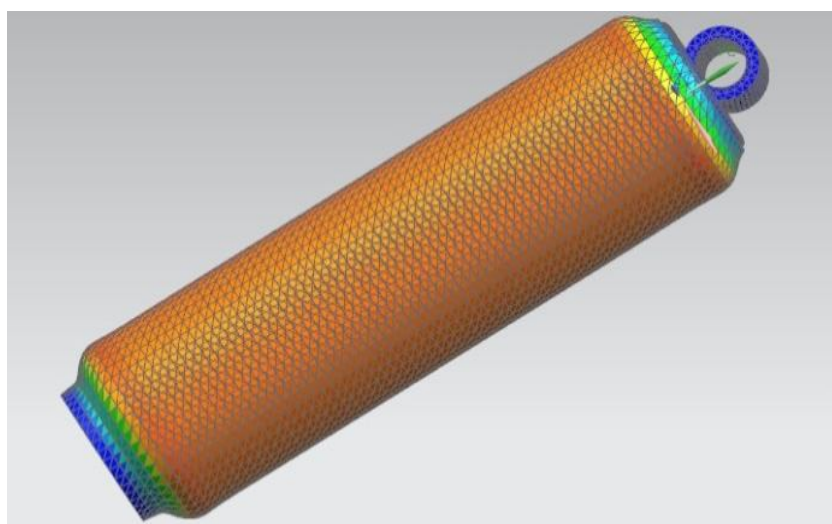


Рис. 4. Распределение напряжений при расчете в NX Nastran

Fig. 4. Stress distribution in the calculation of NX Nastran

Таблица 4

Зависимость значений напряжения от внутреннего давления
в корпусе гидроамортизатора при расчете в NX Nastran

Table 4

Dependence of the voltage values on the internal pressure in the body
of the hydraulic shock absorber when calculated in NX Nastran

Давление, МПа	1.519875	2.0265	8.106	8.612625	9.11925	10.1325	11.14575
Напряжение в цилиндре, МПа	37,79	50,39	201,56	214,16	226,76	251,95	271,5

Таблица 5

Сводная таблица зависимости напряжений от прикладываемого
к корпусу гидроамортизатора внутреннего давления

Table 5

Summary table of the stress dependence on the internal pressure applied
to the body of the hydraulic shock absorber

Давление, МПа	1.519875	2.0265	8.106	8.612625	9.11925	10.1325	11.14575
Напряжение в цилиндре в КОМПАС-3D APM FEM, МПа	36,35	48,46	193,9	206	218,1	242,4	266,6
Напряжение в цилиндре в SolidWorks Sim- ulation, МПа	39.785	53,046	212,237	225,502	238,767	265,297	291,826
Напряжение в цилиндре в NX Nastran, МПа	37,79	50,39	201,56	214,16	226,76	251,95	277,15
Напряжение в цилиндре по ГОСТу 14249- 89, МПа	20,95	27,94	111,75	118,73	125,72	139,69	153,66

Результаты и их обсуждение

Результаты расчёта методом сопро-
тивления материалов по ГОСТу 14249-89

отличаются от результатов расчёта ме-
тодами конечных элементов.

При увеличении давления внутри корпуса гидроамортизатора наблюдается увеличение разности напряжений в расчётах методами конечных элементов и методом сопротивления материалов.

При внутреннем давлении более 11 МПа разница достигает почти 50%. Этот факт необходимо учитывать при проектировании подобных конструкций.

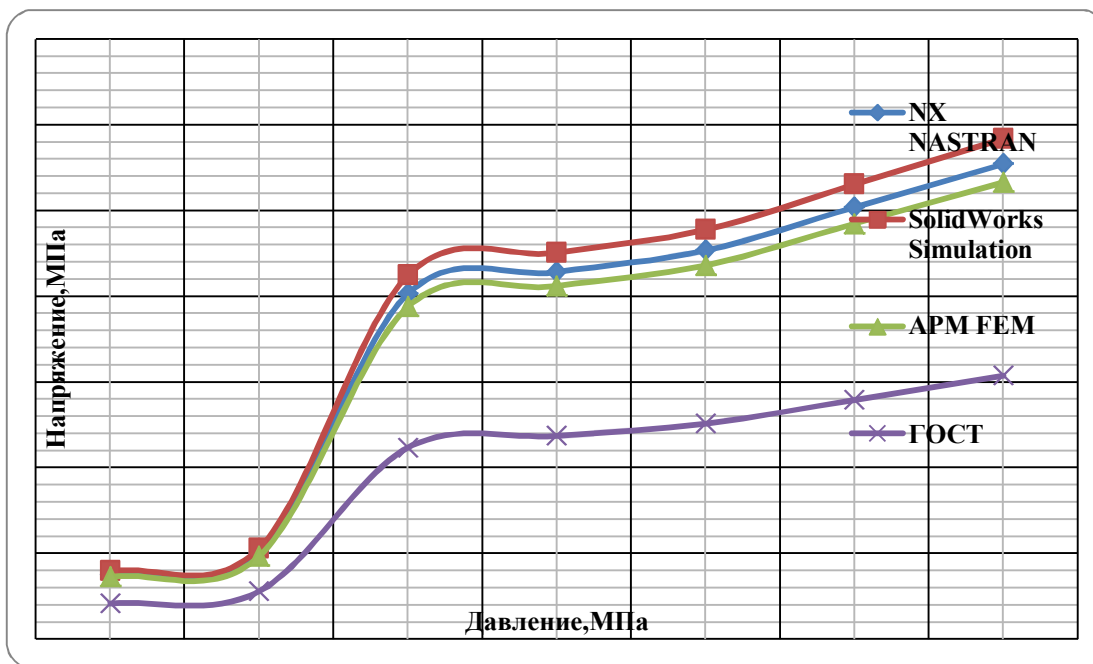


Рис. 5. Зависимости напряжений от прикладываемого к корпусу гидроамортизатора внутреннего давления

Fig. 5. According to the stress applied to the body of the hydraulic shock absorber's internal pressure

Выводы

Совместное использование различных методов расчёта напряжённо-деформированного состояния сварного

корпуса позволяет рационально спроектировать изделие при минимальном расходе материала с заданным коэффициентом запаса прочности.

Список литературы

1. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов в расчетах сварных конструкций. Курск, 2014. 128 с.
2. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. М., 1989.
3. Алпеева Т. В., Емельянов В. М., Котельников А. А. Роботизированная сварка многосортаментных трубчатых элементов. Курск, 2011. 128 с.
4. Родионова И. Н., Алпеева Е. В., Котельников А. А. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчёта сварных кон-

струкций методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2013. №4. С. 111-113.

5. Евсигнеева Н. А., Котельников А. А. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной конструкции // Сварочное производство. 2018. №3. С. 45-48.

6. Абышев К. И., Котельников А. А. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной конструкции // Сварочное производство. 2016. №2. С. 3-6.

7. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трёхмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М.: Изд-во АПМ, 2006. 288 с.

8. Системы автоматизированного проектирования в сварке. Методические указания к выполнению практических работ/сост. М. А. Иванов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 145 с.

9. Бокарев Д. И. Основы систем автоматизированного проектирования в сварке. Воронеж, 2006. 264 с.

10. Котельников А. А., Иванов Н.И. Системы автоматизированного проектирования в сварке. Курск, 2019. 234 с.

11. Программное обеспечение машинной графики / А. А. Котельников, А. Ю. Головенков, А. С. Натаров, В. Ю. Рюмшин. Курск, 2019. 232 с.

Reference

1. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. *Primenenie metoda konechnykh elementov v raschetakh svarnykh konstrukttsii* [Application of the finite element method in the calculation of welded structures]. Kursk, 2014. 128 p. (In Russ.).

2. GOST 14249-89. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. Moscow, 1989. (In Russ.).

3. Alpeyeva T. V., Emelianov V. M., Kotelnikov A. A. *Robotizirovannaya svarka mnogosortamentnykh trubchatykh elementov* [Robotic welding mnogoportsionnyh tubular elements]. Kursk, 2011 128 p. (In Russ.).

4. Rodionova I. N., Alpeeva E. V., Kotelnikov A. A. *Primenenie funktsional'-no-stoimostnogo analiza dlya opredeleniya effektivnosti programm dlya rascheta svarnykh konstrukttsii metodom konechnykh elementov* [Application of functional-cost analysis to determine the effectiveness of programs for the calculation of welded structures by the finite element method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*, 2013, no. 4, pp. 111-113 (In Russ.).

5. Evstigneeva N. A., Kotelnikov A. A. *Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi konstrukttsii* [Application of the finite element method in the calculation of

the welded structure]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production*, 2018, no. 3, pp. 45-48 (In Russ.).

6. Abyshv K. I., Kotelnikov A. A. Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi konstruktsii [Application of the finite element method in the calculation of welded structure]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production*, 2016, no. 2, pp. 3-6 (In Russ.).

7. Zamriy A. A. Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruktsii v srede APM Structure 3D [Finite element Design and calculation of three-dimensional structures in APM Structure 3D]. Moscow, 2006, 288 p. (In Russ.).

8. Computer-aided design in welding. Guidelines for the implementation of practical work. Chelyabinsk, Publishing center SUSU, 2010. 145 p.

9. Bokarev D. I. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v svarke. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu prakticheskikh rabot [Fundamentals of computer-aided design in welding: studies.manual]. Voronezh, 2006. 264 p. (In Russ.).

10. Kotelnikov A. A., Ivanov M.A. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v svarke [Computer-aided design in welding: study guide]. Kursk, 2019, 234 p. (In Russ.).

11. Kotelnikov A. A., Golovenkov A. Yu., Natarov A. S., Ryumshin V. Y. Programmnoe obespechenie mashinnoi grafiki [Software for computer graphics: a tutorial]. Kursk, 2019. 232 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Анатолий Александрович Котельников,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный
университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kotelnikov@ yandex.ru

Anatoly A. Kotelnikov, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation
e-mail: kotelnikov1939@yandex.ru

Ярослав Эдуардович Родионов, студент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный
университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yerodionov96@gmail.com

Yaroslav E. Rodionov, Student, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation
e-mail: yerodionov96@gmail.com

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-54-64>

Изменение физико-механических характеристик грунта эксплуатируемого основания

К.О. Дубракова ¹✉, О.И. Куценко ¹, И.Н. Карцев ¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В данной статье рассматривается изменение физико-механических характеристик грунта основания в процессе эксплуатации объектов строительства и возможность учета указанных изменений при проектировании фундаментов мелкого заложения.

Методы. Исходя из предположения о том, что вес инженерно-геологических элементов основания остается постоянным независимо от уровня действующих дополнительных вертикальных напряжений, получено выражение для определения коэффициента k_γ , учитывающего изменение плотности и удельного веса грунта в процессе эксплуатации зданий и сооружений. При этом, исходя из допущения о том, что эпюра дополнительных вертикальных напряжений треугольная, определено уравнение для вычисления коэффициента k_c , позволяющего определить изменение сцепления грунта в процессе эксплуатации объектов строительства. С применением коэффициентов k_γ и k_c получено выражение для определения изменения расчетного сопротивления грунта основания в процессе эксплуатации объектов строительства.

Результаты. Учет коэффициента k_γ при ширине проектируемого фундамента более двух метров при отношении осадки основания к глубине сжимаемой толщи, равной 0,3, приводит к увеличению расчетного сопротивления эксплуатируемого основания на 5%; на 3 % и на 1% при $S/H_c = 0,2$ и при $S/H_c = 0,1$ соответственно. При этом зависимо от ширины проектируемого фундамента учет коэффициента k_c позволяет превысить R на 25%. Совместный учет рассматриваемых коэффициентов приводит к увеличению расчетного сопротивления грунта основания в среднем на 27%.

Заключение. Полученные коэффициенты, учитывающие изменения удельного веса и сцепления грунта в процессе эксплуатации основания, позволяют достаточно просто оценить рост расчетного сопротивления в процессе обжатия, что, в свою очередь, даёт возможность сэкономить в среднем 10% материала при проектировании фундаментов мелкого заложения.

Ключевые слова: основание; расчетное сопротивление; удельное сцепление; удельный вес.

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

Для цитирования: Дубракова К.О., Куценко О.И., Карцев И.Н. Изменение физико-механических характеристик грунта эксплуатируемого основания // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 54-64. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-54-64>.

Статья поступила в редакцию 12.03.2019

Статья подписана в печать 24.04.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-54-64>

Changes in the Physic-Mechanical Characteristics of the Soil of the Operated Foundation

Kseniya O. Dubrakova ✉¹, Olga I. Kutsenko¹, Ivan N. Kartsev¹

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

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Condition analysis of block of flats after full repairs.

Methods. Inspection of buildings and constructions is an important part of the construction industry allowing analyzing and revealing defects and damages of building constructions, both by visual and tool methods.

The comparative analysis of project documentation and research materials of last years allows revealing condition dynamics of constructions and of low-quality work of contract organizations at various production stages.

Results. The revealed discrepancies during the inspection of block of flats in Kursk city are described. The first one is requirements' neglect of the existing normative documentation to heat technical characteristics of walling. Violations of silicate brick walls' plastering technology are also revealed. The other negative factor is violation of fire safety regulations due to the poor quality of materials used in roof repair and decrease in wood quality in comparison with the design project. At the same time it is determined that strengthening offered by the results of the previous inspections was not applied during full repairs.

Conclusion. It is necessary to pay much attention to each house, its features and damages during full repair. At the same time project documentation has to be complied with modern norms and rules. Materials and order of works have to meet requirements of project documentation. When carrying out small repairs it is necessary to make work acceptance after each completed construction stage to reduce emergence risk.

Keywords: full repairs; inspection; energy efficiency; thermal technology; quality of performed works.

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

For citation: Dubrakova K.O., Kutsenko O.I., Kartsev I.N. Changes in the Physic-Mechanical Characteristics of the Soil of the Operated Foundation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 54-64 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-54-64>.

Received 12.03.2019

Accepted 24.04.2019

Введение

Определение параметров фунда-
ментов мелкого заложения выполняется

из условия не превышения средним
давлением под подошвой расчетного
сопротивления грунта основания [20]:

$$P_{cp} \leq R, \quad (1)$$

где R – расчётное сопротивление, которое определяется по формуле

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k} [M_{\gamma} \cdot k_z \cdot b \cdot \gamma_{II} + M_q \cdot d_1 \cdot \gamma_{II} + (M_q - 1) \cdot d_b \cdot \gamma_{II} + M_c \cdot c_2], \quad (2)$$

где $\gamma_{II} = \frac{G}{H_c}$ – удельный вес грунтов, залегающих ниже подошвы фундамента, определяемый как отношение веса G к глубине сжимаемой толщи.

При этом во многих работах указано, что в процессе эксплуатации физико-механические характеристики грунта основания изменяются, что приводит к увеличению расчётного сопротивления в 1,1...1,3 раза [1-19, 21,22]. Цель работы – учесть данные изменения при проектировании основания и фундамента.

Материалы и методы решения задачи

Известно, что система «здание-основание» претерпевает некоторые деформации, одна из которых осадка S указанного основания. Обозначим удельный вес грунтов, залегающих ниже подошвы фундамента эксплуатируемых зданий и сооружений $\gamma_{II,э}$, тогда

$$\gamma_{II,э} = \frac{G}{H_c - S}. \quad (3)$$

Для анализа изменения удельного веса грунта основания в процессе эксплуатации запишем отношение указанного удельного веса до γ_{II} и после эксплуатации $\gamma_{II,э}$.

$$\frac{\gamma_{II,э}}{\gamma_{II}} = \frac{G \cdot (H_c)}{(H_c - S) \cdot G} = \frac{H_c}{H_c - S} = \frac{1}{1 - \frac{S}{H_c}}. \quad (4)$$

Произведём анализ изменения расчётного сопротивления при различной ширине подошвы фундамента при ва-

рировании отношения $\frac{S}{H_c}$. Учитывая тот факт, что вес грунта сохраняется, изменение удельного веса можно учесть, введя коэффициент k_{γ} , равный

$$k_{\gamma} = \frac{1}{1 - \frac{S}{H_c}}. \quad (5)$$

В это же время в процессе эксплуатации здания и сооружения, в грунте происходит обжатие грунта и соответственно увеличение удельного сцепления. Допустим, что эпюра вертикальных напряжений треугольна.

Сопrotивляемость грунтов сдвигу до обжатия описывается известным выражением, предложенным Кулоном.

$$\tau_p = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c. \quad (6)$$

Считая эпюру дополнительных вертикальных напряжений треугольной, изменение удельного сцепления грунта в процессе эксплуатации зданий и сооружений можно определить из выражения

$$C_{II,э} = C_{II} + \sigma_{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (7)$$

Для удобства вычислений введём коэффициент k_c :

$$K_c = \frac{C_{II,э}}{C_{II}} = \frac{C_{II} + \left(\frac{p}{2}\right) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{C_{II}} = 1 + \frac{\left(\frac{p}{2}\right) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{C_{II}} = 1 + \frac{R \cdot \operatorname{tg} \varphi}{2 \cdot C_{II}}. \quad (8)$$

Записав формулу (2) с учётом выражений (5) и (8), получим уравнение для определения изменения расчётного сопротивления грунта основания в процессе эксплуатации объектов строительства:

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k} [M_{\gamma} \cdot k_z \cdot b \cdot \gamma_{II} \cdot k_{\gamma} + M_q \cdot d_1 \cdot \gamma_{II} + (M_q - 1) \cdot d_b \cdot \gamma_{II} + M_c \cdot c_{II} \cdot k_c]. \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение

Для анализа влияния коэффициента k_γ на значение расчётного сопротивления грунта рассмотрим некоторое основание, сложенное рыхлыми песками с углом внутреннего трения $\varphi=20^\circ$, удельным весом $\gamma_{II}=18 \text{ кН/м}^3$, расчётным сопротивлением $R_0=150 \text{ кПа}$. Определим расчётное сопротивление грунта основания до (R) и после эксплуатации (R_s) при различных отноше-

ниях осадки к глубине сжимаемой толщи $\frac{S}{H_c}$ (рис. 1).

Для более глубокого анализа влияния коэффициента k_γ на значение расчётного сопротивления грунта на рисунке 2 приведен график зависимости отношения расчётного сопротивления эксплуатируемого основания к расчётному сопротивлению R от ширины подошвы фундамента для рассматриваемого основания.

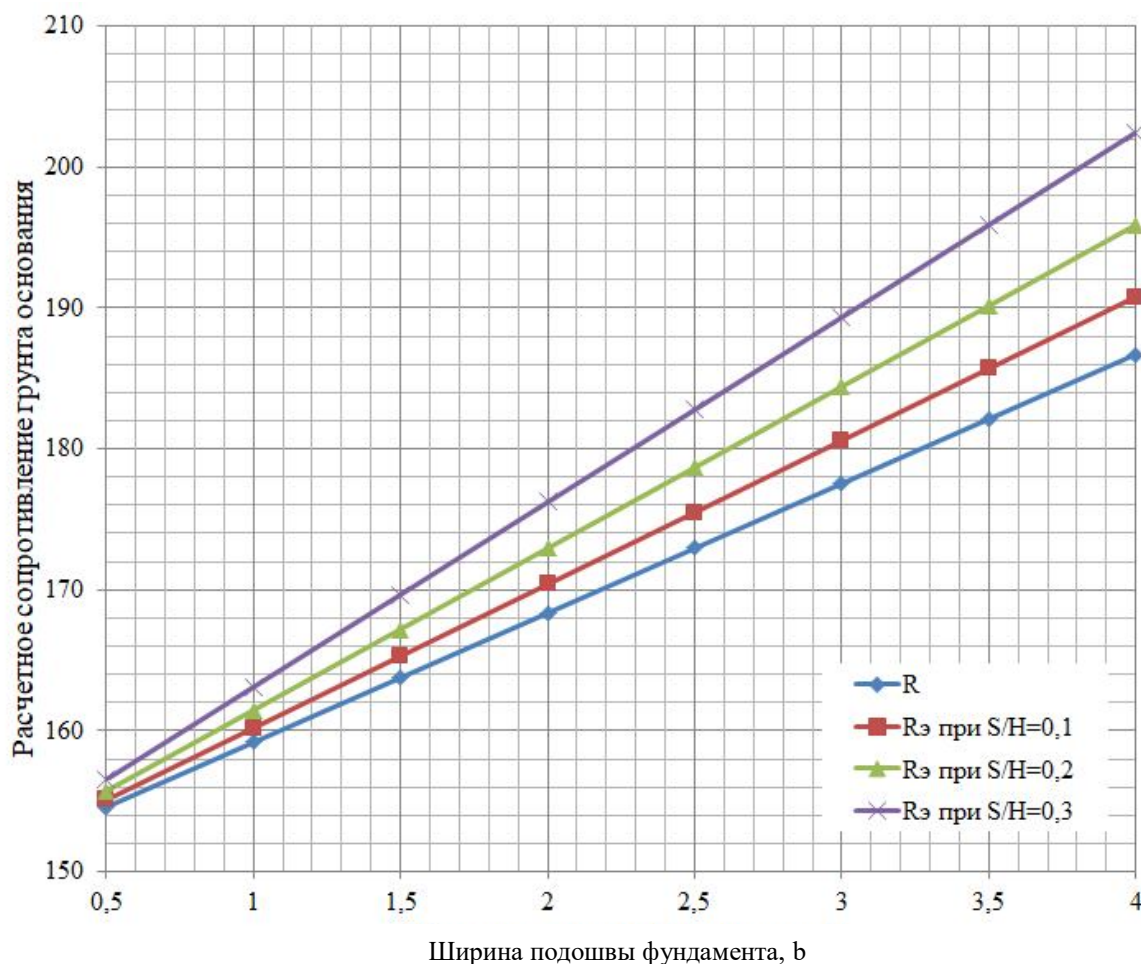


Рис. 1. Расчётное сопротивление грунта основания до (R) и после эксплуатации (R_s) при различных отношениях осадки к глубине сжимаемой толщи $\frac{S}{H_c}$

Fig. 1. The design resistance of the soil base to (R) and after operation (R_s) for different ratios of precipitation to the depth of the compressible $\frac{S}{H_c}$ sequence

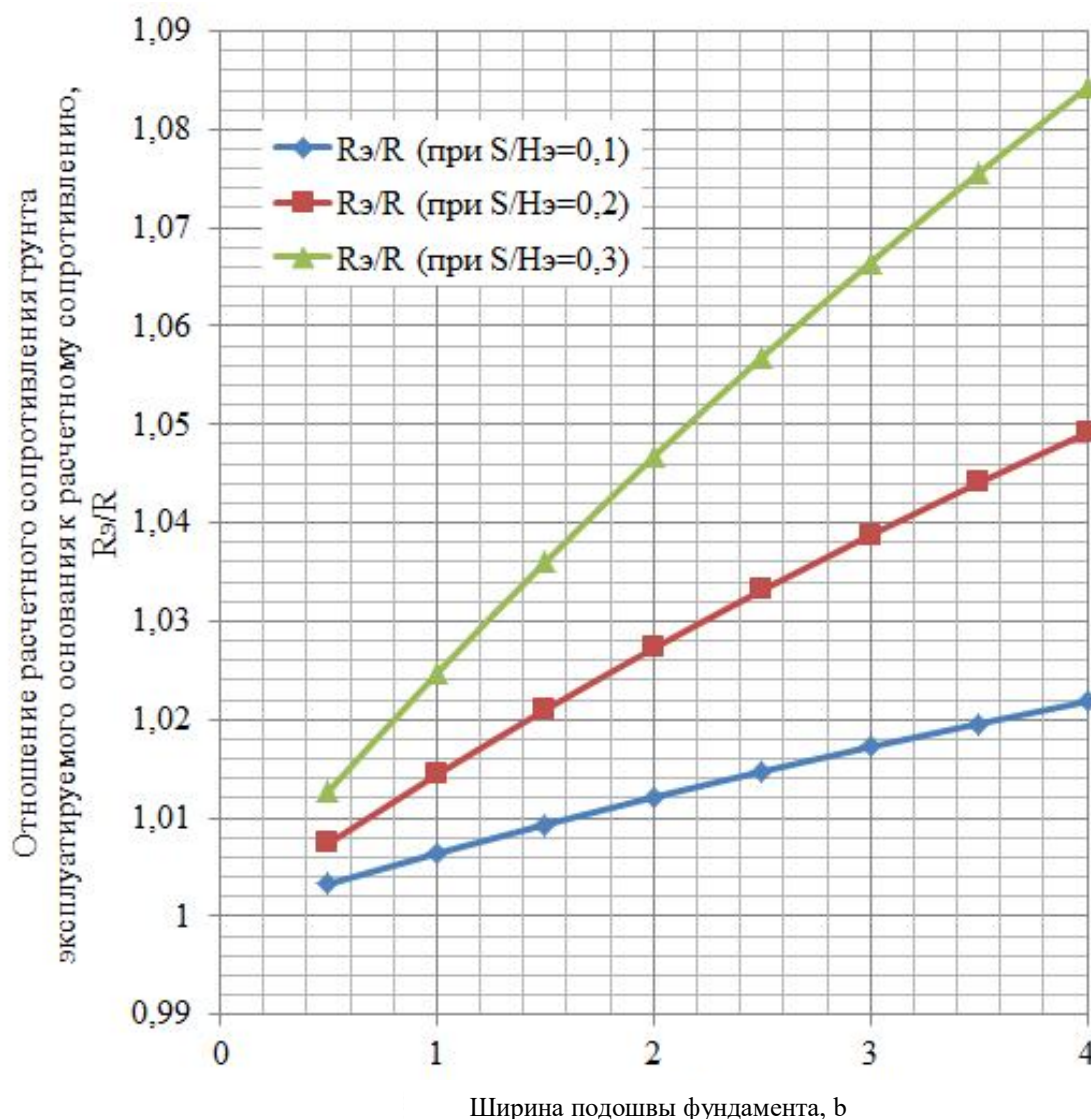


Рис. 2. Отношение расчетного сопротивления грунта основания после (R_e) и до эксплуатации (R) при различных отношениях осадки к глубине сжимаемой толщи $\frac{S}{H_c}$

Fig. 2. The ratio of the calculated resistance of the soil base after (R_e) and before operating (R) at different ratios of precipitation to the depth of the compressible thickness $\frac{S}{H_c}$

Из рисунков 1, 2 видно, что при ширине проектируемого фундамента более двух метров при отношении осадки основания к глубине сжимаемой толщи, равном 0,3, расчетное сопротивление эксплуатируемого основания превышает R на 5%; на 3 % и на 1% при

$S/H_c = 0,2$ и при $S/H_c = 0,1$ соответственно.

Для анализа влияние коэффициента k_c на значение механических характеристик рассматриваемого основания определим расчетное сопротивление грунта основания до (R) и после эксплуатации (R_e).

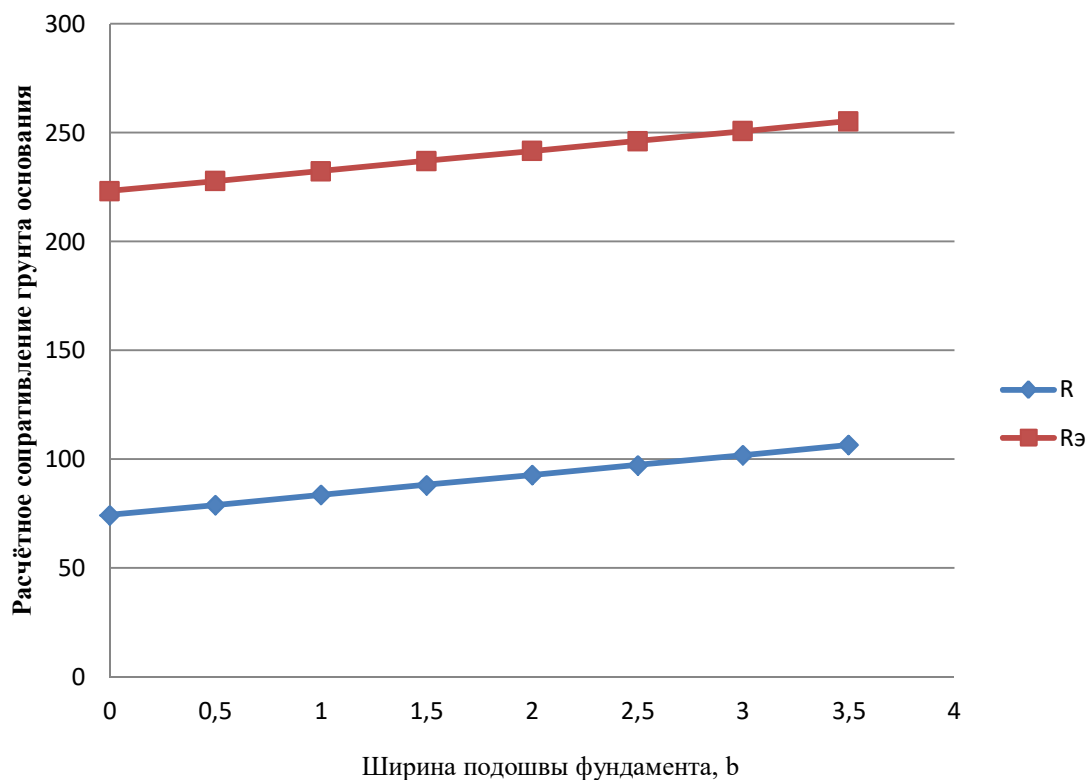


Рис. 3. Расчетное сопротивление грунта основания R и R_э при различных значениях удельного сцепления, до эксплуатации (c_{II}) и после ($c_{II,э}$)

Fig. 3. The design resistance of the soil base R and R_э for different values of specific adhesion, before operating (c_{II}) and after ($c_{II,э}$)

Из рисунка 3 видно, что не зависимо от ширины проектируемого фундамента, расчетное сопротивление эксплуатируемого основания превышает R на 25%.

Для анализа совместного влияния коэффициентов k_γ и k_c на значение расчётного сопротивления грунта рассматриваемого основания, определим расчетное сопротивление грунта основания до (R) и после эксплуатации (R_э) при различных отношениях осадки к глубине сжимаемой толщи $\frac{s}{H_c}$.

Из анализа рис. 4 видно, что совместный учет коэффициентов k_γ и k_c приводит к увеличению расчетного сопротивления грунта основания в среднем на 27%.

Выводы

Полученные коэффициенты, учитывающие изменения удельного веса и сцепления грунта в процессе эксплуатации основания, позволяют достаточно просто определить расчетное сопротивление, что, в свою очередь, даёт возможность сэкономить в среднем 10% материала при проектировании фундаментов мелкого заложения.

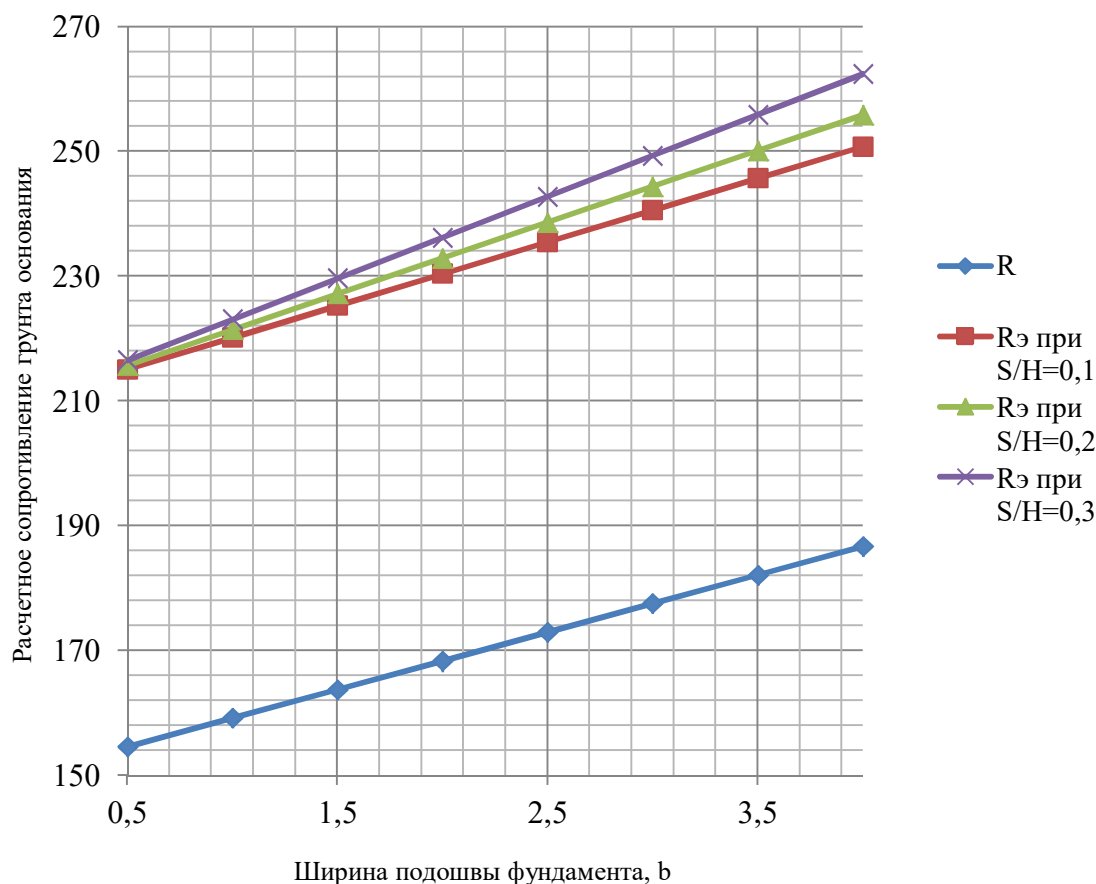


Рис. 4. Расчетное сопротивление грунта основания до (R) и после эксплуатации (R_s) при различных отношениях осадки к глубине сжимаемой толщи $\frac{S}{H_c}$

Fig. 4. Estimated base soil resistance before (R) and after operation (R_s) for different ratios of precipitation to the depth of the compressible S / H_c sequence

Список литературы

1. Nguyen M.D. [et al.] Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression // *Geosynthetics*. 2013. № 20 (3). P. 207–225.
2. Phoon K.-K., Retief J.V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. Matieland, South Africa, 2016. P. 249.
3. Ахлюстин О.Е. Закономерности изменчивости физико-механических свойств просадочных грунтов Анапского р-на Краснодарского края: автореф. дис. ... к.геол.-мин.наук. Екатеринбург, 2013.
4. Барановский А.Г. Изменение физико-механических свойств элювиальных глинистых грунтов под влиянием техногенных факторов // *Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: материалы 9 Междунар. науч.-практ. конф.* М., 2015. С.92-97.

5. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2014. 696с.
6. Деминцева Е.А., Вайнштейн В.М. Анализ изменения физико-механических свойств грунтов при стабилизации их модификатором «Пенетрон» // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. Пермь, 2013. С.157-162.
7. Дмитриева К.О., Мыльченко А.Ю. Изменение расчётного сопротивления грунта основания эксплуатируемого здания // Проектирование и строительство. Курск, 2016. С.19-22.
8. Дмитриева К.О., Дубраков С.В. Механика грунтов. Курск, 2017.
9. Калугин П.И., Пятигор Д.А. Особенности работы грунтов оснований фундаментов после реконструкции зданий // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. №1. С.60-64.
10. Расчётный анализ длительного деформирования системы «здание-основание здания» хранилища ядерных отходов АЭС / В.И. Колчунов, В.В. Потапов, К.О. Дмитриева, В.А. Ильин // Строительство и реконструкция. 2017. №4(72). С.27-33.
11. Оценка влияния возводимого многоэтажного здания на техническое состояние близлежащих строений / А.А. Краснов, А.Л. Четвериков, С.Г. Шейна, В.Г. Шумеев // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии города: сборник материалов III Всероссийской научной конференции. Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. С.3-5.
12. Сопоставление результатов экспериментальных исследований механических свойств аргиллитов при выборе параметров, используемых в проектировании зданий и сооружений / М.А. Акбуляков, А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина, А.Ю. Черепанов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 7-17.
13. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Исследования механических свойств глинистых грунтов в условиях пространственного напряжённого состояния // Известия КГАСУ. 2010. №1(13). С.170-175.
14. Никифоров В.В., Селиверстов М.М., Березнев В.А. Инженерные решения реконструкции фундамента в условиях аномалий физико-механических свойств грунта // Молодёжная наука. Технологии, инновации: сб. трудов. Пермь, 2014. С.282-286.
15. Полищук А.И. Подход к оценке загрузки оснований фундаментов реконструируемых и восстанавливаемых зданий // Вестник ТГАСУ. 2000. №1. С.313-326.
16. Пономарёв А.Б. К вопросу об изменении физико-механических характеристик грунтов в процессе строительства и эксплуатации зданий // Строительство и транспорт. 2013. №2(14). С.104-109.
17. Простов С.М., Смирнов Н.А., Бахаева С.П. Прогноз физико-механических свойств намывного массива по данным электрических зондирований // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. №1. С.69-78.
18. Изменение расчётного сопротивления грунтов основания, работающего как нелинейная неупругая система / А.А. Сморгков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №2. С.54-56.

19. Расчёт деформаций основания с использованием нелинейной неупругой системы / А.А.Сморчков, С.А.Кереб, Д.А.Орлов, К.О.Барановская // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №2. Ч.3. С.182-185.
20. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. М.: Институт ОАО «НИЦ «Строительство», 2016.
21. Торков В.В., Цимбелман Н.Я. Изменение физико-механических свойств грунтов при сейсмическом воздействии // Вологодские чтения. 2014. №70. С.7-8.
22. Оценка взаимного влияния зданий и подземных сооружений / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, В.А. Васенин // Георекострукция. 2012. №231.

Reference

1. Nguyen M.D. [et al.] Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforced strain under triaxial compression. *Geosynthetics*, 2013, no. 20 (3), pp. 207–225.
2. Phoon K.-K., Retief J.V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. Matieland, South Africa, 2016, p. 249.
3. Akhlyustin O.E. *Zakonomernosti izmenchivosti fiziko-mekhanicheskikh svoystv prosadochnykh gruntov Anapskogo r-na Krasnodarskogo kraya*. Author. diss. kand. geol.-min.n. [Patterns of variability of the physicommechanical properties of the subsiding soils of the Anapa district of the Krasnodar Territory. Kand. geol.-min. sci. avtoref. diss.]. Ekaterinburg, 2013 (In Russ.).
4. Baranovsky A.G. [Changes in the physical and mechanical properties of eluvial clay soils under the influence of man-made factors]. *Materialy 9 Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami v sovremennom mire"* [Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world. Collection]. Moscow, 2015, pp.92-97 (In Russ.).
5. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie vo-prosa* [Methods for determining the mechanical properties of soils. State of the question]. Penza, PGUAS Publ., 2014, 696 p. (In Russ.).
6. Demintseva E.A., Weinstein V.M. [Analysis of changes in the physical and mechanical properties of soils with their stabilization modifier "Penetron"]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and research in the transport complex]. Perm, 2013, pp.157-162 (In Russ.).
7. Dmitriev K.O., Mylchenko A.Yu. *Izmenenie raschetnogo soprotivleniya grunta osnovaniya ekspluatiruemogo zdaniya* [Change in the design resistance of the soil of the base of the building in use]. *Proektirovanie i stroitel'stvo=Design and construction*. Kursk, 2016, pp.19-22 (In Russ.).
8. Dmitrieva K.O., Dubrakov S.V. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Kursk, 2017 (In Russ.).

9. Kalugin P.I., Pyatigor D.A. Osobennosti raboty gruntov osnovanii fundamentov posle rekonstruktsii zdaniy [Peculiarities of the operation of the foundation soil after the reconstruction of buildings]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*=*Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*, 2017, no.1, pp.60-64 (In Russ.).

10. Kolchunov V.I., Potapov V.V., Dmitrieva K.O., Ilyin V.A. Raschetnyi analiz dlitel'nogo deformirovaniya sistemy «zдание-osnovanie zdaniya» khranilishcha yadernykh otkhodov AES [Calculated analysis of the long-term deformation of the “building-foundation of the building” system of a nuclear waste storage facility of NPPs]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*=*Construction and reconstruction*, 2017, no.4 (72), pp.27-33 (In Russ.).

11. Krasnov A.A., Chetverikov A.L., Sheina S.G., Shumeev V.G. [Evaluation of the Impact of a High-Rise Building Being Built on the Technical Condition of the Nearby Buildings]. *Sbornik materialov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya i ekologii goroda"*. [Collection of materials of the III All-Russian Scientific Conference "Problems of Construction, Engineering Support and Ecology of the City"]. Penza, 2001, pp.3-5 (In Russ.).

12. Akbul'yakov M.A., Ponomarev A.B., Sychkina E.N., Cherepanov A.Yu. Sopostavlenie rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy mekhanicheskikh svoystv argillitov pri vybore parametrov, ispol'zuemykh v proektirovanii zdaniy i sooruzhenii [Comparison of the results of experimental studies of the mechanical properties of mudstones when choosing the parameters used in the design of buildings and structures]. *Vestnik PNIPU. Urbanistika*=*PNIPU. Urbanistics Bulletin*, 2013, no. 1 (In Russ.).

13. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Issledovaniya mekhanicheskikh svoystv glinistykh gruntov v usloviyakh prostranstvennogo napryazhennogo sostoyaniya [Studies of the mechanical properties of clay soils under conditions of spatial stress state]. *Izvestiya KGASU*=*News of KGASU*, 2010, no. 1 (13), pp. 170-175 (In Russ.).

14. Nikiforov V.V., Seliverstov M.M., Bereznev V.A. Inzhenernye resheniya rekonstruktsii fundamenta v usloviyakh anomalii fiziko-mekhanicheskikh svoystv grunta [Engineering solutions for the reconstruction of the foundation in terms of anomalies of the physical and mechanical properties of the soil]. *Molodezhnaya nauka*=*Youth Science*, 2014, pp.282-286 (In Russ.).

15. Polishchuk A.I. Podkhod k otsenke zagruzheniya osnovanii fundamentov rekonstruiemykh i vosstanavlivaemykh zdaniy [Approach to the assessment of the loading of the foundations of the foundations of the bases of the reconstructed and restored buildings]. *Vestnik TGASU*=*Herald of the TSUHU*, 2000, no. 1, pp.313-326 (In Russ.).

16. Ponomarev A.B. K voprosu ob izmenenii fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik gruntov v protsesse stroitel'stva i ekspluatatsii zdaniy [On the issue of changing the physical and mechanical characteristics of soils in the process of construction and operation of buildings]. *Stroitel'stvo i transport*=*Construction and transport*, 2013, no. 2(14), pp.104-109 (In Russ.).

17. Prostov S.M., Smirnov N.A., Bakhaeva S.P. Prognoz fiziko-mekhanicheskikh svoystv namyvnoy massiva po dannym elektricheskikh zondirovaniy [Forecast of the physi-

cal and mechanical properties of the alluvial massif according to the data of electrical soundings]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh=Physical and technical problems of the development of mineral resources*, 2015, no.1, pp. 69-78 (In Russ.).

18. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Orlov D.A., Baranovskaya K.O. Izmenenie raschetnogo soprotivleniya gruntov osnovaniya, rabotayushchego kak nelineinaya neuprugaya sistema [Change in the design resistance of soils of the foundation operating as a nonlinear inelastic system]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo=Industrial and civil construction*, 2014, no.2, pp.54 -56 (In Russ.).

19. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Orlov D.A., Baranovskaya K.O. Raschet deformatsii osnovaniya s ispol'zovaniem nelineinoy neuprugoy si-stemy [Calculation of base deformations using a nonlinear inelastic system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no.2, pt.3, pp.182-185 (In Russ.).

20. SP 22.13330.2016. The foundations of buildings and structures. Moscow, Institute of JSC "SRC" Construction Publ., 2016 (In Russ.).

21. Torov V.V, Tsimbelman N.Ya. Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv grun-tov pri seismicheskom vozddeistvie [Changing the physicommechanical properties of soils under seismic effects]. *Vologdinskie chteniya=Vologda Readings*, 2014, no.70, pp.7-8 (In Russ.).

22. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Vasenin V.A. Otsenka vzaimnogo vliyaniya zdaniy i podzemnykh sooruzhenii [Evaluation of the mutual influence of buildings and underground structures]. *Georekonstruktsiya=Georeconstruction*, 2012, no. 231 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Дубракова Ксения Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Ksenia O. Dubrakova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Industrial and Civil Construction Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: sirius080993@yandex.ru

Куценко Ольга Ивановна, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Olga I. Kutsenko, Associate Professor, Industrial and Civil Construction Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: sirius080993@yandex.ru

Карцев Иван Николаевич, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Ivan N. Kartsev, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: sirius080993@yandex.ru

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-65-73>

Определение коэффициента интенсивности напряжений в балке с центральной трещиной и оценка критической длины трещины

А. В. Масалов ¹✉

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: masalow.al@ya.ru

Резюме

Цель исследования. Предложить аналитический способ определения коэффициента интенсивности напряжений по второй форме разрушения в балке с трещиной. Использование полученного решения, при наличии экспериментальной базы значений критических коэффициентов интенсивности напряжений позволит учитывать влияние трещин и трещиноподобных повреждений, обнаруженных в балках при обследованиях.

Методы. Предлагается способ вычисления коэффициента интенсивности напряжений по второй форме разрушения (поперечный сдвиг) в балках, с помощью аналитического метода - известного в сопротивлении материалов и строительной механике метода сечений. Для этого с использованием гипотез распределения нормальных и касательных напряжений по поперечным и продольным сечениям составляются условия равновесия мысленно отсечённых частей изгибаемого элемента. Подобная методика расчёта может быть применена при оценке несущей способности деревянных балок, имеющих эксплуатационные повреждения – расслоения клеевых швов, усушечные и силовые трещины.

Результаты. С использованием предложенной методики сделана оценка критического размера сквозной, не выходящей на торец трещины в деревянной балке при кратковременном нагружении. В качестве исходных данных для расчёта приняты экспериментальные данные, полученные автором.

Заключение. Для практического применения этой методики следует на основании экспериментальных данных подобрать значения тарировочных коэффициентов, наилучшим образом дающие совпадение теоретического решения с экспериментальными данными. Кроме этого, в дальнейшем экспериментальном исследовании необходимо получение и уточнение зависимостей критического коэффициента интенсивности напряжений от эксплуатационных факторов: длительности нагружения, влажности древесины, размеров сечения, положения трещины, соотношения глубины трещины и общей ширины сечения элементов.

Ключевые слова: деревянная балка; метод сечений; коэффициент интенсивности напряжений; критическая длина трещины.

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

Для цитирования: Масалов А. В. Определение коэффициента интенсивности напряжений в балке с центральной трещиной и оценка критической длины трещины // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 65-73. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-65-73>.

Статья поступила в редакцию 21.03.2019

Статья подписана в печать 06.05.2019

© Масалов А. В., 2019

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(3): 65-73

Determination of Stress Intensity Factor in a Beam with a Central Crack and Estimation of the Critical Crack Length

Aleksandr V. Masalov ¹✉

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

✉ e-mail: masalow.al@ya.ru

Abstract

Purpose of research. Propose an analytical method for determining the stress intensity factor for the second form of fracture in a beam with a crack. It will be possible to take into account the influence of cracks and crack-like damage found in beams during surveys using the solution obtained, in the presence of an experimental base of values of the critical stress intensity factors.

Methods. It is proposed a method for calculating the stress intensity factor for the second form of fracture (transverse shear) in the beams using the analytical method known in the resistance of materials and structural mechanics of the section method. To do this, equilibrium conditions are created for mentally cut parts of a bent element using the hypotheses of the distribution of normal and tangential stresses along transverse and longitudinal sections. This method of calculation can be applied in assessing the carrying capacity of wooden beams that have operational damage, such as laminations of adhesive joints and trimmed and force cracks.

Results. Using the proposed technique, we have estimated the critical size of a through-going that does not reach the end of a wooden beam under short-term loading. The experimental data obtained by the author are taken as the initial data for the calculation.

Conclusion. For the practical application of this technique, on the basis of experimental data, the values of the calibration coefficients should be selected that match the theoretical solution with the experimental data best of all. In addition, in a further experimental study, it is necessary to obtain and refine the dependencies of the critical stress intensity factor on operational factors: loading duration, wood moisture, cross-sectional dimensions, crack position, crack depth ratio and total cross-sectional width of elements.

Keywords: wooden beam; method of sections; stress intensity factor; critical crack length.

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

For citation: Masalov A. B. Determination of Stress Intensity Factor in a Beam with a Central Crack and Estimation of the Critical Crack Length. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 65-73 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-65-73>.

Received 21.03.2019

Accepted 06.05.2019

Введение

При анализе напряжённо-деформированного состояния элементов строительных конструкций, в том числе и деревянных, обычно исходят из гипотезы сплошности материала [1, 2]. Возмож-

ные отклонения от этой гипотезы учитывают коэффициентами условий работы. Опыт эксплуатации конструкций показывает, что в реальности часто в конструкциях появляются повреждения в виде трещин и другие повреждения,

по своему характеру схожие с трещинами – трещиноподобные повреждения [3, 4]. Это весьма характерно для конструкций из древесины. Использование аппарата механики разрушения для анализа напряжённо-деформированного состояния позволит уточнить результаты оценки несущей способности элемента.

Расчёты элементов с трещиноподобными дефектами могут производиться с использованием теории линейной механики разрушения [5- 9]. В этом случае вычисляют коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Для проверки несущей способности делают сравнение вычисленного КИН с его критическим значением для данного материала, которое получают экспериментально. Задачу вычисления КИН в настоящее время обычно решают численными методами [6, 7]. Использование метода сечений для вычисления КИН было сделано в работе [8] только для первой формы разрушения (нормальный отрыв).

В данной работе применён аналогичный подход для вычисления КИН по второй форме разрушения (поперечный сдвиг).

Цель работы – предложить аналитический способ определения коэффициента интенсивности напряжений по второй форме разрушения в балке с трещиной.

Материалы и методы

Рассмотрим балку со сквозной трещиной длиной s посередине (рис. 1,а), решим задачу в предположении упругого поведения материала. Рассмотрим

отдельно действие изгибающего момента M_c и поперечной силы $F/2$ (рис. 1б и 1в) вблизи вершины трещины. Рассмотрим действие изгибающего момента M_c (рис.1г). Отсечём продольной плоскостью на уровне нейтрального слоя нижнюю часть балки и заменим её действие касательными напряжениями τ_M . Согласно условию равновесия, по цельному сечению балки распределены нормальные напряжения σ_M . Если считать форму распределения нормальных напряжений по высоте сечения независимой от способа приложения нагрузки (принцип Сен-Венана), то их максимальное значение в месте вершины трещины, $\sigma_M = \frac{M_c}{W}$, где W – момент сопротивления сечения. На самом деле, закон распределения нормальных напряжений по цельному сечению приобретает вид, показанный на эпюре σ_M только на расстоянии βh от вершины трещины. Значение коэффициента $\beta \geq 1$ требует уточнения.

Сумма проекций всех сил на горизонтальную ось должна быть равна нулю. Следовательно, равнодействующая сила от σ_M для верхней части балки уравнивается равнодействующей от τ_M ,

$$\sum X = T_{\tau_M} - T_{\sigma_M} = 0. \quad (1)$$

Для определения равнодействующей от τ_M примем гипотезу распределения

$$\tau_M = \frac{K_{IIIM}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{1}{\sqrt{\beta h}} \right), \quad (2)$$

где K_{IIIM} – КИН от действия изгибающего момента M_c в месте вершины трещины;

x – горизонтальная координата с началом в точке вершины трещины, причём $x \leq \beta h$.

Распределение τ_M , согласно этой зависимости, показано на рис.1,г.

Определим значение равнодействующей T_τ от τ_M с учётом (2)

$$T_{\tau M} = \int_0^{\beta h} \tau_M dx = \int_0^{\beta h} \left(\frac{K_{IIIM}}{\sqrt{\pi x}} - \frac{K_{IIIM}}{\sqrt{\pi h}} \right) dx = K_{IIIM} \sqrt{\frac{\beta h}{\pi}}. \quad (3)$$

Равнодействующая T_σ от σ_M в верхней части балки

$$T_{\sigma M} = \frac{3}{2} \frac{M_c}{bh}. \quad (4)$$

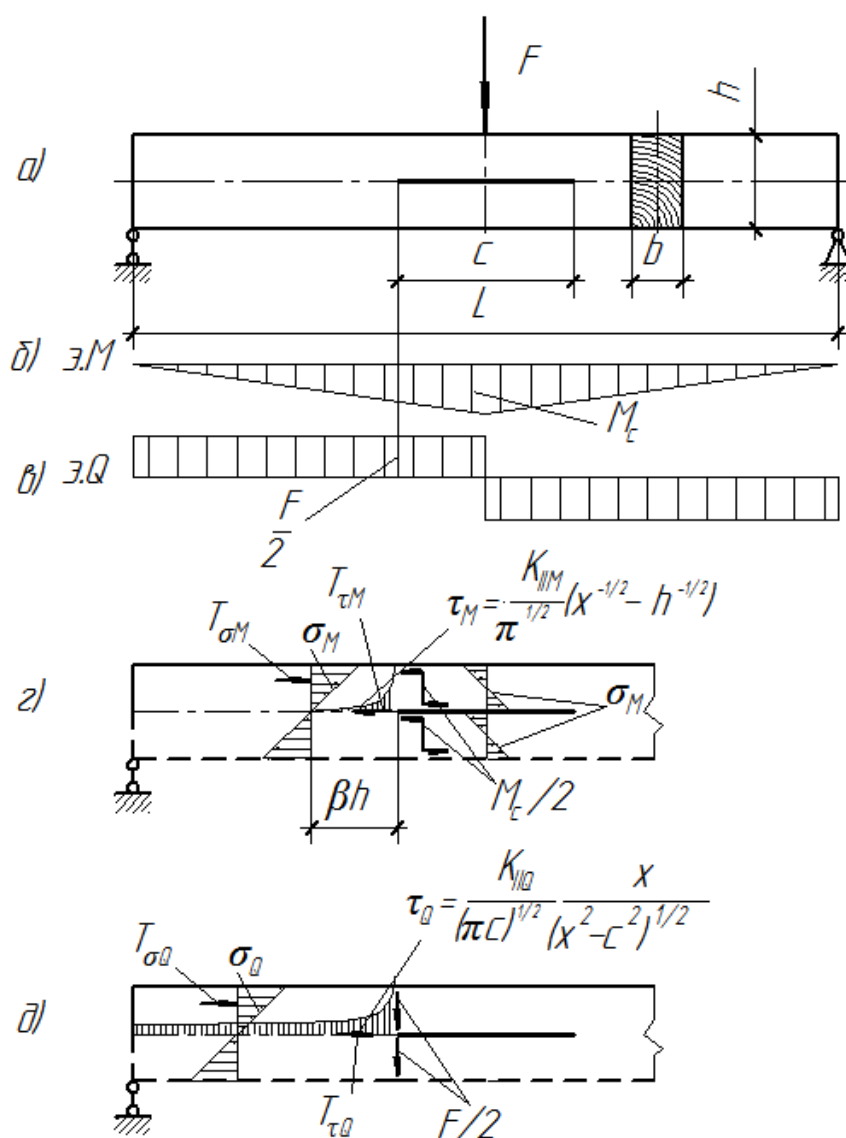


Рис.1. К определению коэффициента интенсивности напряжений

Fig.1. To the determination of stress-intensity factor

Согласно (1), (3) и (4)

$$K_{IIIM} = \frac{3}{2} \frac{M_c}{bh} \sqrt{\frac{\pi}{\beta h}} = \frac{3}{2} \frac{F}{bh} \sqrt{\pi c} \frac{L}{4\sqrt{c\beta h}}. \quad (5)$$

Формулу (5) можно привести к виду

$$K_{IIIM} = \tau \sqrt{\pi c} Y_M, \quad (6)$$

где $\tau = \frac{3}{2} \frac{F}{bh}$ – номинальное касательное напряжение на уровне нейтрального слоя балки, подсчитанное по формуле Журавского;

$$Y_M = \frac{L}{4\sqrt{c\beta h}} - \text{К-тарировка.}$$

Рассмотрим действие поперечной силы F (рис.1д). Аналогично предыдущему решению отсечём продольной плоскостью на уровне нейтрального слоя нижнюю часть балки и заменим её действие касательными напряжениями τ_Q . Согласно условию равновесия по сечениям балки вплоть до опоры, распределены нормальные напряжения σ_Q . Их максимальное значение в сечении, соответствующем вершине трещины

$$\sigma_Q = \frac{Fc}{4W} = \frac{3}{2} \frac{Fc}{bh^2}. \quad (7)$$

Равнодействующая сила этих напряжений равна

$$T_{\sigma Q} = \frac{3Fc}{8bh}. \quad (8)$$

Примем гипотезу распределения касательных напряжений [1]:

$$\tau_Q = \tau_K \frac{x}{\sqrt{x^2 - c^2}}, \quad (9)$$

$$\tau_K = \frac{K_{IIQ}}{\sqrt{\pi c}}, \quad (10)$$

где K_{IIQ} – КИН II от действия поперечной силы, начало координатной оси x на торце балки.

Определим величину равнодействующей $T_{\tau Q}$ от касательных напряжений:

$$T_{\tau Q} = \int_c^L \tau_Q dx = 2K_{IIQ} \sqrt{\frac{L^2 - c^2}{\pi c}}. \quad (11)$$

Из условия равенства нулю проекций всех сил на горизонтальную ось x запишем $\Sigma X = T_{\sigma Q} - T_{\tau Q} = 0$ и уравнений (8), (9) и (10) следует

$$K_{IIQ} = \tau \sqrt{\pi c} Y_Q, \quad (12)$$

где $Y_Q = \alpha \frac{c}{8\sqrt{L^2 - c^2}}$ – вторая К-тарировка; коэффициент α учитывает особенности поведения древесины.

Согласно решениям задач (рис.1г и рис.1д), К-тарировку, учитывающую действие изгибающего момента и поперечной силы, определим как

$$Y = Y_M + Y_Q = \frac{L}{4\sqrt{c\beta h}} + \frac{\alpha c}{8\sqrt{L^2 - c^2}}, \quad (13)$$

Следовательно, K_{II} можно определить как

$$K_{II} = K_{IIIM} + K_{IIQ} = \tau \sqrt{\pi c} (Y_M + Y_Q). \quad (14)$$

или

$$K_{IIC} = \tau \sqrt{\pi c} \left(\frac{L}{4\sqrt{c\beta h}} + \frac{\alpha c}{8\sqrt{L^2 - c^2}} \right). \quad (15)$$

Для прямоугольного сечения

$$K_{IIC} = \frac{3F}{4bh} \sqrt{\pi c} \left(\frac{L}{4\sqrt{c\beta h}} + \frac{\alpha c}{8\sqrt{L^2 - c^2}} \right). \quad (16)$$

Результаты и их обсуждение

Выполним оценку критического размера трещины для расчётной схемы, представленной на рис.1. Под критическим размером трещины будем понимать её наибольшую длину, когда она ещё не оказывает влияния на несущую способность элемента. Для уточнения полученной формулы (16) следует точнее определять коэффициенты β и α , учитывающие особенности распределения напряжений в древесине. В приведенной оценке примем коэффициенты $\beta=1$ и $\alpha=1$.

Примем следующие кратковременные механические характеристики древесины для расчёта, полученные в ходе наших испытаний [6]: прочность на скалывание при изгибе $R_s=4,5$ МПа, прочность на растяжение при изгибе $R_b=45$ МПа, критический коэффициент интенсивности напряжений по второй

форме разрушения $K^{IIc}=1,4$ МПа $\cdot$ м^{1/2}. Пролёт балки $L=5$ м, ширина $b=0,13$ м, высота прямоугольного сечения h принимает значения 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8м.

Кратковременная разрушающая нагрузка от скалывания при изгибе:

$$F_s = \frac{2}{3} b h R_s = 195 \text{ кН} . \quad (17)$$

Кратковременная разрушающая нагрузка от растяжения при изгибе:

$$F_b = \frac{2}{3} \frac{b h^2 R_b}{L} = 195 \text{ кН} . \quad (18)$$

Решаем уравнение (16) относительно c – длины сквозной центральной трещины, принимая значение F минимальным из значений (17) и (18) – в данном частном примере они равны. На основании нескольких результатов решения строим график зависимости длины критической трещины c_{cr} и отношения высоты сечения к пролёту балки h/L (рис.2).

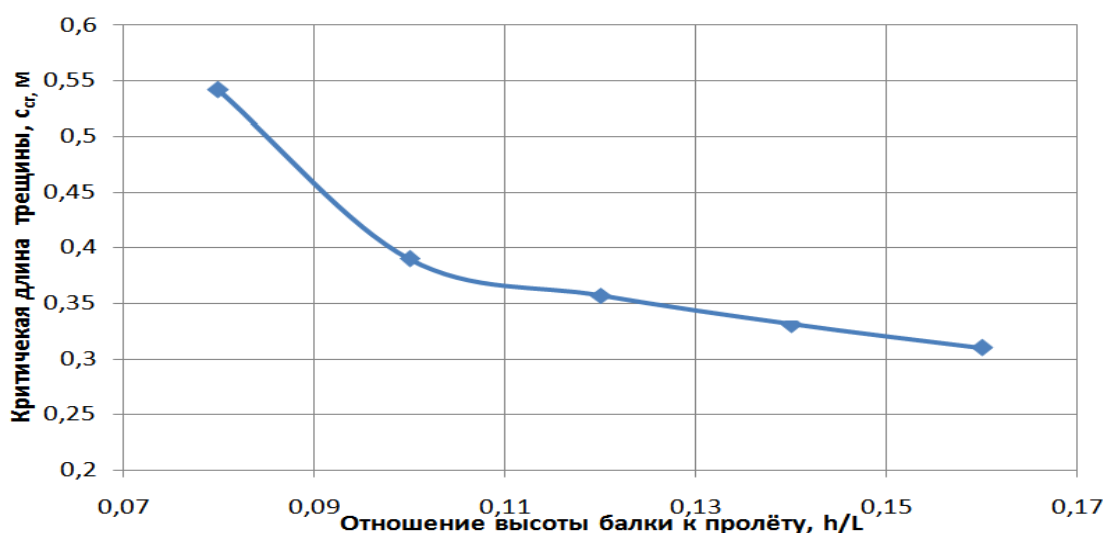


Рис.2. Зависимость критической длины трещины от отношения высоты сечения балки к её пролёту

Fig. 2. Dependence of the critical crack length on the ratio of the height of the beam section to its span

Выводы

Для практического применения этой методики следует на основании экспериментальных данных подобрать значения тарировочных коэффициентов, наилучшим образом дающие совпадение теоретического решения с экспериментальными данными. Кроме этого, в дальнейшем экспериментальном

исследовании необходимо получение и уточнение зависимостей критического коэффициента интенсивности напряжений от эксплуатационных факторов: длительности нагружения, влажности древесины, размеров сечения, положения трещины, соотношения глубины трещины и общей ширины сечения элементов.

Список литературы

1. Дубракова К.О., Галаева Д.Х. Нелинейные деформации статически определенных деревянных конструкций // Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 145-150.
2. Оценка напряжений в балках при изгибе по их прогибу / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, А.В. Козлов, К.О. Барановская // Математические методы и инновационные научно-технические разработки: сборник. Курск, 2014. С. 78-81.
3. Дубраков С.В., Сморчков А.А., Кереб С.А. Дефекты и повреждения деревянных конструкций от силовых и средовых факторов // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций-XXI: сборник материалов научно-методической конференция ВИТУ, посвященной 90-летию со дня рождения профессора В.Т. Гроздова. Воронеж, 2017. С. 152-157.
4. Травуш В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Экспериментально-теоретическое исследование прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом и средовом воздействии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 280-285.
5. Партон В.В., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Наука, 1985. 504 с.
6. Barrett J.D., Foschi R.O. Mode II stress-intensity factors for cracked wood beams // Eng. Fr. Mech. 1977. Vol. 9. P.371-378.
7. Murphy J.F. Strength of wood beams with end splits // Forest Prod. Lab. Research Pap.-1979, FPL 347.
8. Морозов Е.М. Метод сечений в теории трещин // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1969. №3. С.22-25.

9. Stupishin L., Kabanov V., Masalov A. Mode II stress intensity factor determination for cracked timber beams/ *Advances in Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering* – Kim, Jung & Seo (Eds), Taylor & Francis Group, London, 2016. ISBN 978-1-138-02849-4.

10. Масалов А.В. Трещиностойкость изгибаемых клееных деревянных элементов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1992.

Reference

1. Dubrakova K.O., Galayeva D.Kh. [Nonlinear deformations of statically definable timber structures]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Resursosberezhenie i ekologiya stroitel'nykh materialov, izdelii i konstruktsii"*. [Collection of Scientific Works of the International Scientific and Practical Conference "Resource Saving and Ecology of Building Materials, Products and Structures"]. Kursk, 2018, pp. 145-150 (In Russ.).

2. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Orlov D.A., Kozlov A.V., Baranovskaya K.O. [Evaluation of stresses in beams during bending along their deflection]. *Sbornik "Matematicheskie metody i innovatsionnye nauchno-tehnicheskie razrabotki"* [Collection "Mathematical methods and innovative scientific and technical developments"]. Kursk, 2014, pp. 78-81 (In Russ.).

3. Dubrakov S.V., Smorchkov A.A., Kereb S.A. [Defects and damage to timber structures from force and environmental impacts]. *Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruktsiy-XXI. Sbornik materialov nauchno-metodicheskoi konferentsii VITU*. [Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures-XXI. Collection Scientific and Methodological Conference of VITU]. Voronezh, 2017, pp. 152-157 (In Russ.).

4. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie prochnosti i ustoichivosti szhatykh sterzhnei iz drevesiny pri silovom i sredovom vozdeistvii [Experimental and theoretical study of the strength and stability of compressed wood rods under force and environmental impact]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti = News of higher educational institutions. Technology textile industry*, 2016, no. 3 (363), pp. 280-285 (In Russ.).

5. Parton V.V., Morozov E.M. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya: ucheb. posobie dlya studentov universitetov i vtuzov [Mechanics of elastoplastic destruction: studies. manual for students of universities and technical colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 504 p. (In Russ.).

6. Barrett J.D., Foschi R.O. Mode II stress-intensity factors for cracked wood beams. *Eng. Fr. Mech.* 1977, vol.9, pp.371-378.

7. Murphy J.F. Strength of wood beams with end splits. Forest Prod. Lab. Research Pap, 1979, FPL 347.
8. Morozov E.M. Metod sechenii v teorii treshchin [The method of sections in the theory of cracks]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = Construction and architecture*, 1969, no. 3, pp.22-25 (In Russ.).
9. Stupishin L., Kabanov V., Masalov A. Mode II: Stress intensity factor for the construction of civil engineering, Kim, Jung & Seo (Eds), Taylor & Francis Group, London, 2016. ISBN 978-1-138-02849-4.
10. Masalov A.V. Treshchinostoikost' izgibaemykh kleenykh derevyannykh elementov . Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Crack resistance of bend glued wooden elements. Kand. eng. sci. abstract diss.]. Voronezh, 1992 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Масалов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: masalow.al@ya.ru

Alexander V. Masalov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: masalow.al@ya.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-74-85>

Девелопмент объектов недвижимости культурного наследия

А.В. Шлеенко ¹ ✉, А.Ю. Аннаев ², А.И. Черняева ¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

² Гарлыкский горно-обогатительный комбинат, п. Гарлык, Лебапский велаят, Койтендагский этрап, 746300, Туркменистан

✉ e-mail: shleenko77@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Культура – это совокупность лучших достижений человека, которые способствуют его духовному росту и преобразению. Сегодня этой сфере жизни людей уделяется особое внимание: реализуются проекты по развитию современных форм и сохранению уже созданных. Россия – страна, имеющая насыщенную историю и очень богатая выдающимися людьми, поэтому и объекты недвижимости культурного наследия очень разнообразны. Данное исследование посвящено вопросам сохранения и возможного использования объектов недвижимости, которые представляют собой культурное значение.

Методы. На основании законодательства Российской Федерации и документации, представленной органами местного самоуправления, а также статистических данных проведен анализ ситуации по развитию такого вида деятельности, как девелопмент объектов культурного наследия.

Результаты. Рассмотрена последовательность работ, входящих в состав данной деятельности, особое внимание уделено механизму взаимодействия государства с частными организациями посредством привлечения их ресурсов для реализации проектов в данной сфере. Так же в данной работе проведен анализ уровня ГЧП на примере Курской области и сделаны необходимые выводы по этой проблеме.

Заключение. Было выявлено, что главным подходом для развития такого взаимодействия является создание новых усовершенствованных форм реализации партнерства и продвижение, а в некоторых регионах даже создание, региональных стратегий поддержки.

Ключевые слова: девелопмент; объект недвижимости; строительство; сохранение; культурное наследие, государственно-частное партнерство.

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

Для цитирования: Шлеенко А.В., Аннаев А.Ю., Черняева А.И. Девелопмент объектов недвижимости культурного наследия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 74-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-74-85>.

Статья поступила в редакцию 06.05.2019

Статья подписана в печать 20.05.2019

Development of Real Estate Objects with Cultural Heritage

Aleksey V. Shleenko ¹ ✉, Akmurat Yu. Annayev ², Anna I. Chernyaeva ¹

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

² Garlykskiy mining and processing works, item Garlyk, Lebap Region, Koytendagsky etrap, 746300, Turkmenistan

✉ e-mail: shleenko77@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Culture – a set of the best achievements of man, which contribute to his spiritual growth and transformation. Today, special attention is paid to this sphere of people's life: projects are being implemented to develop modern forms and preserve those already created. Russia – a country with a rich history and is very rich in outstanding people, so the real estate cultural heritage is very diverse. This study is devoted to the preservation and possible use of real estate, which are of cultural importance.

Methods. On the basis of the legislation of the Russian Federation and the documentation provided by local governments, and also statistical this analysis of a situation on development of such type of activity as development of objects of cultural heritage is carried out.

Results. The sequence of activities included in this activity is considered, special attention is paid to the mechanism of interaction between the state and private organizations, by attracting their resources for the implementation of projects in this area. Also in this paper, the analysis of the level of PPP on the example of the Kursk region and made the necessary conclusions on this problem.

Conclusion. It was found that the main approach for the development of such interaction is the creation of new improved forms of partnership implementation and promotion, and in some regions even the creation of regional support strategies.

Keywords: development; real estate; construction; preservation; cultural heritage; public-private partnership.

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

For citation: Shleenko A. V., Annayev A. Yu., Chernyaeva A. I. Development of Real Estate Objects with Cultural Heritage. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 74-85 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-74-85>.

Received 06.05.2019

Accepted 20.05.2019

Введение

Сегодня проблема сохранения объектов недвижимости, представляющих большое историческое и культурное значение, весьма актуальна и поддерживается со стороны государственной и муниципальной властей. Специалистами разрабатываются нормативные до-

кументы по урегулированию данного вопроса. Особое внимание уделяется объектам культурного наследия, параметры которых могут позволить их преобразовывать при необходимости и вовлекать в предпринимательскую деятельность, увеличив их стоимость и по-

лучая прибыль при эксплуатации. Данный подход к развитию и управлению объектами наследия является частью системы преобразования объектов недвижимости, получившей название девелопмент [1].

В соответствии с законодательством Российской Федерации предметами культурного наследия (историческими памятниками и памятниками культуры) являются объекты недвижимого имущества, а так же связанные с ними произведения искусства (живописи, скульптуры, декоративно-прикладного творчества), объекты научно-технического прогресса и другие предметы, относящиеся к материальной культуре, которые возникли в ходе различных событий отечественной и мировой истории, представляющие собой огромную ценность для истории, археологии, архитектуры, градостроительства, искусства, науки и техники, этнологии или антропологии, социальной культуры и являющиеся свидетельством эпох и людей, к которым они относятся.

Девелопмент – это предпринимательская деятельность, которая связана со строительством объекта недвижимости, реконструкцией или преобразованием уже построенного здания или земельного участка, которая приводит к увеличению стоимости этого объекта. Данный процесс имеет возможность трансформации одного объекта, который не развит и не востребован на рынке недвижимости, в другой, востребо-

ванный объект, приносящий прибыль. Экономическая составляющая девелопмента осуществляется в увеличении ценности недвижимости, представляющей историческое значение, в результате произведенных физических изменений. При этом сами такие преобразования не являются аргументом для повышения ценности объекта – они влекут за собой изменение объекта, обладающего определенными качествами, которые делают этот объект востребованным на рынке недвижимости. Девелопмент представляет собой комплекс работ, направленный на управление объектом недвижимости [2].

Материалы и методы решения задачи

В таблице представлена последовательность состава работ по девелопменту объектов недвижимости культурного наследия [3]. Данная деятельность состоит из ряда работ, к которым относятся, в первую очередь, разработка идеи самого проекта, коммерческий, технический и финансовые анализы, создание такого механизма, как государственно-частное партнерство, для реализации проекта, описание его правовой составляющей, непосредственно финансирование и проектирование с последующим заключением контрактов и строительство и, а так же в заключение всей этой деятельности находится маркетинг и процесс управления результатами, с представленными этапами их выполнения.

Последовательность состава работ по девелопменту
объектов недвижимости культурного наследия

Sequence of structure of works on development of real estate objects of cultural heritage

1. Разработка и подготовительное изучение плана проекта: • определение бизнес-идеи; • ориентировочный анализ. Development of the concept and preliminary consideration of the project: • formulation of the business idea; • preliminary analysis
2. Оценка коммерческой целесообразности проведения намеченных работ: • прогноз развития региона по социально-экономическим показателям; • анализ рынка недвижимости; • анализ конкурентной среды; • создание плана маркетинга продукта. Analysis of commercial feasibility of works: • forecast of social and economic development of the region; • analysis of the real estate market; • analysis of the competitive environment; • development of the marketing plan of a product
3. Оценка технической составляющей проекта: • исследование осуществимости плана со стороны законодательства; • получение задания на проектирование; • изучение физической возможности осуществления проекта; • учет потребительских и инженерных требований к разработке проекта реконструкции объекта наследия; • создание эскиза проекта. Technical analysis: • research of legal feasibility of the project; • receiving design assignment; • research of physical capacity of implementation of the project; • configuration of consumer, engineering design requirements of reconstruction of an object of heritage; • development of the outline sketch
4. Организация взаимодействия государства с частными лицами (государственно-частного партнерства) для осуществления проекта: • анализ возможности участия государства в реализации плана; • образование группы для проработки вариантов взаимодействия; • разработка идей реализации проекта посредством механизмов ГЧП; • выбор более подходящего варианта участия в ГЧС; • сравнение ГЧС с традиционными способами приобретения прав на объект по экономическим показателям.

Creation of public-private partnership for implementation of the project: • assessment of a possibility of the state participation in the project; • creation of initiative group of study of options of partnership; • development of options of implementation of the project with the help of mechanisms of PPP; • choice of a preferable way of participation in GChS; • assessment of economic advantages of GChS in comparison with traditional ways of acquisition of the rights for an object
5. Изучение финансового состояния и финансовых результатов деятельности: • формулировка потребностей инвестирования; • анализ стоимости капитала, который привлекается для осуществления данного проекта; • выбор схемы и источников финансирования; • мониторинг денежных потоков от реализации проекта; • анализ проекта по показателям эффективности. Financial analysis: • definition of investment requirements of the project; • estimation of cost of the capital attracted for implementation of the investment project; • choice of the scheme and establishment of sources of financing; • the forecast of profits and cash flows due to implementation of the project; • assessment of indicators of efficiency of the project
6. Обеспечение правовой составляющей проекта: • оформление ГЧП, заключение контрактов, договоров концессии, аренды, управления, создание совместных предприятий; • оформление вещных прав на объект; • заключение договоров с охранными организациями; • согласование эскиза проекта; • выдача задания на реставрационные работы, а так же разрешений на научно-исследовательское проектирование и проектные работы. Legal support of the project: • registration of PPP, signing of the contracts, contracts of concession, rent, management, creation of joint ventures; • registration of property rights on an object, the rights of use and the order of an object; • conclusion of security contracts; • coordination of the outline sketch; • delivery of a planned and restoration task, permissions to research design and project works
7. Финансирование: • привлечение активов; • управление финансовыми потоками. Organization of financing: • attraction of financing; • management of cash flows on the project

Окончание табл.

8. Проектирование:

- выполнение исследований для корректировки проектного решения;
- согласование принятого решения с органами охраны населения;
- создание рабочего проекта;
- экспертиза проекта.

Design:

- performance of research and project works for coordination of the design decision;
- coordination of the design decision with bodies of protection of the population;
- development of the working draft;
- conducting examination of the project

9. Заключение контрактов и строительство объекта:

- проведение тендеров и заключение контрактов с подрядчиками;
- создание систем взаимодействия и контроля между участниками реализации проекта;
- производство работ согласно проектной документации;
- авторский надзор;
- организация проверок надлежащего исполнения охранных обязательств во время строительной фазы проекта;
- участие в работе проверочных комиссий, проводимых АТИ, органами охраны населения, банком, а также ведомственными инспекциями и комиссиями;
- передача завершеного строительного объекта;
- подготовка и сдача в эксплуатацию готового объекта;
- участие в работе комиссии по вводу объекта в эксплуатацию.

Signing of the contracts and construction of the facility:

- tendering process and signing of the contracts with contractors;
- creation of systems of interaction and control between participants of implementation of the project;
- works according to the project documentation;
- architectural supervision;
- the organization of checks of appropriate execution of security obligations during a construction phase of the project;
- participation in work of the test commissions which are carried out by ATI, bodies of protection of the population, bank and also departmental inspectorates and the commissions;
- transfer of a complete construction object;
- preparation and commissioning of a ready object;
- participation in work of the commission on commissioning of the facility

10. Маркетинг, управление и распоряжение результатами:

- исполнение договорных отношений ГЧП.

Marketing, management and order of results:

- execution of the contractual relations of PPP

Результаты и их обсуждение

Одной из основных возможностей сохранения объектов недвижимости культурного наследия без существенного обременения государственного бюджета, на наш взгляд, является развитие механизмов государственно-частного партнерства. Положительный зарубежный опыт реконструкций и преобразований таких объектов с привлечением частного капитала дает основания для данных утверждений [4].

Государственно-частное партнерство (ГЧП) — это форма сотрудничества между государством и частными инвесторами с заключением соглашения на неопределенный срок, основанная на объединении ресурсов для реализации проекта. Теперь коммерческие структуры и другие частные лица могут вкладывать средства в проекты, которыми управляет государство.

У нашей страны большой опыт применения государственно-частного партнерства в различных отраслях экономики. Еще в XIX веке на основе привлечения государством инвесторов с их материальными ресурсами стремительно разворачивалось масштабное строительство железнодорожного полотна по все территории России. Данные соглашения должны предусматривать не только само строительство железной дороги, но и её последующую эксплуатацию. Применение нового вида экономического сотрудничества государства и частных организаций оказалось довольно успешным и весьма эф-

фективно способствовало экономическому росту, дало возможность развития данной формы взаимодействия и в других отраслях [5].

В настоящее время тема внедрения механизмов государственно-частного партнерства является одной из наиболее обсуждаемых в российских общественных кругах. Несмотря на то, что ГЧП проекты в России осуществлялись всегда, «новая волна» развития данного вида сотрудничества относится к началу 2000 годов.

Сейчас такие отношения регулируются законом № 224-ФЗ, который был подписан 13 июля 2015 года. Инвестор получает право собственности на новый объект. Однако эти права ограничены. Объект нельзя отчуждать третьим лицам, и его следует использовать только в соответствии с соглашением о государственно-частном партнерстве [6].

На сегодняшний день государственно-частное партнерство в России становится основным способом улучшения региональной и муниципальной инфраструктуры, привлечения финансирования со стороны частных инвесторов, повышения качества услуг, оказываемых населению, —повышается интерес для инфраструктурных инвестиций, появляются интересные идеи об осуществлении проектов, и растет число заинтересованных в долгосрочном партнерстве инвесторов и инфраструктурных компаний. Однако уровень развития ГЧП в нашей стране еще не вы-

шел на высокий уровень. Почти в трети субъектов Российской Федерации отсутствует специализированная структура или перечень объектов, в отношении которых возможно заключение соглашения о ГЧП.

Данная ситуация отражается на комплексном показателе, который принято называть «Уровень развития сферы государственно-частного партнерства в субъектах Российской Федерации», в соответствии с которым аналитики составляют рейтинг развития государственно-частного партнерства в регионах и определяют общий уровень в Российской Федерации. Данный показатель определяется согласно методике, утвержденной приказом Минэкономразвития России от 15.05.2014 № 266. Коэффициент в соответствии с законодательством следует вычислять по следующей формуле:

$$R_j = \alpha \times L_j + \beta \times N_j + \gamma \times E_j, \quad (1)$$

где j – порядковый номер субъекта Российской Федерации;

α , β , γ – значения, определяющие значимость составляющих факторов, при этом $\alpha = 0,03$, $\beta = 0,03$, $\gamma = 0,04$;

L_j – значение фактора «Развитие институциональной среды субъекта Российской Федерации в сфере государственно-частного партнерства»;

N_j – значение фактора «Нормативно-правовое обеспечение сферы государственно-частного партнерства»;

E_j – значение фактора «Опыт реализации проектов государственно-частного партнерства»¹.

В Курской области уровень развития ГЧП на сегодняшний день остается весьма на низком уровне. По итогам 2018 года регион занимает 61 место из 85 субъектов Российской Федерации и 14 среди областей, входящих в состав Центрального федерального округа с показателем уровня развития сферы ГЧП, равным 27,9%². Такую форму взаимодействия необходимо развивать главным образом в направлении объектов недвижимости, особенно тех объектов, которые представляют особое историческое и культурное значение для региона. Недавно были внесены данные об 11 объектах и к настоящему моменту в ЕГРН содержатся сведения о 113 объектах культурного наследия Курской области, что составляет 10,3 % от общего числа. И даже многие из учтенных в реестре находятся в состоянии, требующем восстановления, и могут являться предметом соглашения о ГЧП [7].

В 2016 году в публичный перечень объектов инфраструктуры, в отношении которых возможно заключение соглашения о государственно-частном или о муниципально-частном партнерстве, состоящий из наименований 45 зданий и

¹ РОСИНФРА платформа поддержки инфраструктурных проектов: 2013-2019. URL: <http://www.pppi.ru/regions> (Дата обращения: 12.04.2019).

² Приказ Минэкономразвития России от 15.05.2014 N 266 (ред. от 04.02.2016) с 28-33.

сооружений, расположенных по всей территории Курской области, были включены только 2 объекта культурного наследия федерального значения [7]. На данный момент уже оформлено право оперативного управления в их отношении и проведены необходимые мероприятия по реконструкции. Сегодня восстановленные здание Дворянского собрания (1877 г.) и дом поэта Фета Афанасия Афанасьевича используются по своему назначению.

Сейчас в регионе заключаются концессионные соглашения, но среди предметов договоров практически нет объектов недвижимости культурного наследия. Такое положение не устраивает администрацию области и поэтому на 2019 год поставлена цель сосредоточения усилий на развитии государственно-частного, муниципально-частного партнерства и создание Центра развития ГЧП для подготовки проектов [8].

Выводы

В отношении проектов, связанных с объектами культуры, могут возникать сложности с поиском инвесторов. Основными причинами отказа от взаимодействия с государственными или муниципальными властями в данной сфере могут служить долгосрочность проектов, отсутствие гарантий по получению прибыли или возврату затраченных средств, несвоевременное финансирование со стороны партнера, изменение спроса, дополнительные траты, но и

государство в свою очередь несет определенные риски и самым главным можно выделить – вероятность потерять объект культурного значения в том виде, в котором он был, и в котором было необходимо его сохранить [9].

Вопреки существующим рискам для одной и другой сторон и относительно небольшое число реализованных проектов в данной сфере механизм государственно-частного партнерства является эффективным. Это доказано отечественным и зарубежным опытом. Культурное наследие – это часть общественного, в том числе и государственного достояния, которая освоена культурным поколением людей и передаётся им по наследству следующему поколению, представляющая собой мощный ресурс для стабильного развития и уровня жизни, посредством культурного туризма. На сегодняшний день основная цель представляется формированием в культурной сфере устойчивых подходов, более эффективное применение и развитие в регионах нашей страны новых форм взаимодействия государства с частными организациями [10-12]. В этом случае важной составляющей стратегий, которые направлены на решение важнейших экономических и культурных проблем страны, должны стать отраслевые и региональные планы государственно-частного партнерства, предусматривающие участие международных системообразующих и финансовых институтов.

Список литературы

1. Бредихин В.В. Шлеенко А.В., Бредихина Н.В. Развитие производственно-технического потенциала строительной отрасли. Курск, 2016. 114 с.
2. Дабагян Е.К. Развитие государственно-частного партнёрства в Российской Федерации // Российское предпринимательство. 2015. Т. 16. № 4. С. 611-622.
3. Чернявский А.С. Управление сохранением и развитием объектов недвижимости культурного наследия: дис. ... канд. экон. наук. М., 2011. 158 с.
4. Нагорная М. С., Шевцов В.В. Зарубежный опыт государственно-частного партнерства в сфере культуры // Вестник совета молодых ученых и специалистов Челябинской области. 2017. №4 (19). Т.4. С.43-51.
5. Анализ динамики регионального развития экосистем / С.Н. Волкова, Е.Е. Сивак, М.И. Пашкова, В.В. Герасимова А.В. Шлеенко // Региональный Вестник. 2016. №1(2). С. 33-36.
6. Гранкин В.Ф., Шлеенко А.В. Аспекты управления землями крупного города в рыночных условиях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №6(45). С. 193-200.
7. Единый государственный реестр объектов культурного наследия. URL: <https://kartarf.ru/dostoprimechatelnosti> (Дата обращения: 10.04.2019)
8. Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Сивак Е.Е. Оценка допустимого воздействия на водные объекты // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. №3(54). С. 57-62.
9. Дмитриева А.А., Шлеенко А.В. Управление инвестиционными проектами в строительстве // Молодежь и XXI век - 2016: материалы VI Международной молодежной научной конференции (25-26 февраля 2016 г.): в 4 т. Курск, 2016. Т. 3. С.228-230.
10. Шлеенко А.В., Лыкова В.В., Никулина М.Ф. Инновационные технологии и материалы в сфере строительства и ЖКХ // Молодежь и XXI век - 2016: материалы VI Международной молодежной научной конференции(25-26 февраля 2016 г.): в 4 т. Курск, 2016. Т. 3. С.348-353.
11. Шлеенко А.В., Шаповалов И.Г., Басова Д.А. Развитие профессионального управления объектами коммерческой недвижимости в России // Молодежь и XXI век - 2016: материалы VI Международной молодежной научной конференции (25-26 февраля 2016 г.): в 4 т. Курск, 2016. Т. 3. С.344-348.
12. Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Шлеенко А.В. Управление инновационно-инвестиционными процессами в социально-экономических системах. Курск, 2015. 423 с.

Reference

1. Bredikhin V. V., Shleenko A.V., Bredikhina N. V. Razvitie proizvodstvenno-tekhnicheskogo potentsiala stroitel'noi otrasli [Development of technological capacity of construction branch]. Kursk, 2016, 114 p. (In Russ.).
2. Dabagyan E.K. Razvitie gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v Rossiiskoi Federatsii [Development of public-private partnership in the Russian Federation]. *Rossiiskoe predprinimatel'stvo = the Russian business*, 2015, vol. 16, no. 4, pp 611-622 (In Russ.).
3. Chernyavskii A.S. Upravlenie sokhraneniem i razvitiem ob"ektov nedvizhimosti kul'turnogo naslediya. Diss. kand. ekon. nauk. Moscow, 2011, 158 p. (In Russ.).
4. Mountain M.S., Shevtsov V. V. Zarubezhnyi opyt gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v sfere kul'tury [Foreign experience of public-private partnership in the sphere of culture]. *Vestnik soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoi oblasti = The Bulletin of council of young scientists and experts of Chelyabinsk region*, 2017, vol. 4, no. 4 (19), pp. 43-51 (In Russ.).
5. Volkova S. N., Sivak E.E., Pashkova M. I., Gerasimova V. V., Shleenko A.V. Analiz dinamiki regional'nogo razvitiya ekosistem [Analysis of dynamics of regional development of ecosystems]. *Regional'nyi Vestnik = Regional Bulletin*, 2016, no. 1(2), pp. 33-36 (In Russ.).
6. Grankin V.F., Shleenko A.V. Aspekty upravleniya zemlyami krupnogo goroda v rynochnykh usloviyakh [Aspects of management of lands of the large city in market conditions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 6(45), pp. 193-200. (In Russ.).
7. Edinyi gosudarstvennyi reestr ob"ektov kul'turnogo naslediya [Unified state register of objects of cultural heritage]. Available at: URL:<https://kartarf.ru/dostoprimechatelnosti> (Accessed 10.04.2019) (In Russ.).
8. Shleenko A.V., Volkova S. N., Sivak E.E. Otsenka dopustimogo vozdeistviya na vodnye ob"ekty [Assessment of admissible impact on water objects]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2014, no. 3(54), pp. 57-62 (In Russ.).
9. Dmitriyeva A.A., Shleenko A.V. [Management of investment projects in construction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Molodezh' i XXI vek - 2016"* [Materials VI of the International youth scientific conference "Youth and the XXI century - 2016"]. Kursk, 2016, vol. 3, pp. 228-230 (In Russ.).
10. Shleenko A.V., Lykova V.V., Nikulina M.F. [Innovative technologies and materials in the sphere of construction and housing and communal services of]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Molodezh' i XXI vek - 2016"* [Materials VI of

the International youth scientific conference "Youth and the XXI century - 2016"]. Kursk, 2016, vol. 3, pp. 348-353 (In Russ.).

11. Shleenko A.V., I. Shapovalov G., Basova D. A. [Development of professional management of objects of commercial real estate in Russia]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Molodezh' i XXI vek - 2016"* [Materials VI of the International youth scientific conference "Youth and the XXI century - 2016"]. Kursk, 2016, vol. 3, pp. 344-348 (In Russ.).

12. Volkova S. N., Sivak E.E., Shleenko A.V. Upravlenie innovatsionno-investitsionnymi protsessami v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Management of innovative and investment processes in social and economic systems]. Kursk, 2015, 423 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Шлеенко Алексей Васильевич, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью, горного дела, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shleenko77@mail.ru

Aleksey V. Shleenko, Candidate Economic Sciences, Associate Professor, Expertise and Real Estate Management Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: shleenko77@mail.ru

Аннаев Акмурат Юсупович, специалист маркшейдерской службы Гарлыкского ГОКа, п. Гарлык, Туркменистан e-mail: annayew_93@mail.ru

Akmurat Yu. Annayev, Expert of Surveying Office of Garlik MPP, Item Garlyk, Turkmenistan e-mail: annayew_93@mail.ru

Черняева Анна Ильинична, студент кафедры экспертизы и управления недвижимостью, горного дела, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aniuta.cherniaeva@yandex.ru

Anna I. Cherniaeva, Student, Expertise and Real Estate Management Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: aniuta.cherniaeva@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-86-99>

Алгоритмы автоматизированного обучения диалоговых систем

Д.В. Спирин ✉¹, О.С. Брежнев¹

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

✉ e-mail: spirin.dmitrij@list.ru

Резюме

Цель исследования. Представленное в данной статье исследование проведено в рамках проекта Salebot.pro (на ресурсе <https://salebot.pro>) и было нацелено на разработку простой и эффективной реализации диалоговой системы.

Методы. План исследования предусматривал анализ различных методов обработки естественных языков и машинного обучения. Реализации методов были взяты из популярных библиотек с открытым исходным кодом. Построена модель диалоговой системы в двух вариантах: на основе фреймворка Spacy и метрического алгоритма оценки, на основе расстояния Левенштейна. Сравнивались простота реализации и затраты на обучение системы и персонала.

Результаты. Описанные в статье алгоритмы сопоставляют наиболее похожие слова из двух текстов и подсчитывают средний процент совпадений. Такой подход обеспечивает возможность приемлемой работы на языках со свободным порядком слов, к которым относится и русский язык. Выполненное исследование позволило разработать алгоритм автоматизированного обучения диалоговых систем в режиме реального времени без потери контекста. На той же основе разработан алгоритм обучения диалоговой системы по истории диалога. Предлагается использовать данные алгоритмы совместно. При создании диалоговой системы первоначально необходимо ее обучить на истории диалогов, а затем перманентно обучать в режиме реального времени.

Заключение. Достоинством разработанного алгоритма является легкость в реализации и дешевизна построения инфраструктуры, необходимой для обучения модели, и ее обслуживания, а также простота в эксплуатации. Применяется подход, который отличается от обучения с учителем, что позволяет ускорить процесс обучения и ввода в систему новых данных. Особенностью разработанных алгоритмов является игнорирование семантики текста, что делает обучение автоматизированным, а не автоматическим.

Ключевые слова: диалоговая система; конечный автомат; фрейм; автоматизированное обучение; алгоритм.

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

Для цитирования: Спирин Д.В., Брежнев О.С. Алгоритмы автоматизированного обучения диалоговых систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 86-99. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-86-99>.

Статья поступила в редакцию 17.05.2019

Статья подписана в печать 05.06.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-86-99>

Automated Training Algorithms of Dialog Systems

Dmitriy V. Spirin ¹, Oleg S. Brezhnev ¹

¹ Penza State University, 40, Krasnaya str., Penza, 440026, Russian Federation

✉ e-mail: spirin.dmitrij@list.ru

Abstract

Purpose of research. The research described in this article is conducted within the Salebot.pro project (on the <https://salebot.pro> resource) and aimed at development of simple and effective realization of a dialog system.

Methods. The research plan provided the analysis of various methods of natural processing languages and machine learning languages. Implementation of these methods was taken from popular libraries with an open source code. The model of a dialog system was made in two options: on the basis of Spacy freymvork and metric assessment algorithm, on the basis of Levenstein's distance. Simplicity of implementation and costs on training of a system and personnel were compared.

Results. The algorithms described in article compare the most similar words from two texts and count average percent of coincidence. Such approach provides a possibility of acceptable work in languages with free word order. Russian is one such languages. The executed research allowed developing an automated training algorithm of dialog systems in real time without context loss. On the same basis training algorithm of a dialog system in dialog history is developed. It is offered to use these algorithms together. It is originally necessary to train it at history of dialogues during creation of a dialogue system. And then it is necessary to train it permanently in real time.

Conclusion. The advantage of the developed algorithm is ease in implementation and low cost of infrastructure which is necessary for model training and its service and also operation simplicity. Approach which differs from training with the teacher allows accelerating training process and input of new data into the system. Specific feature of the developed algorithms is ignoring of text semantics that makes training automated but not automatic.

Keywords: dialog system; finite-state machine; frame; automated training; algorithm.

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

For citation: Spirin D. V., Brezhnev O.S. Automated Training Algorithms of Dialog Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 86-99 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-86-99>.

Received 12.03.2019

Accepted 04.04.2019

Введение

Разработкой систем виртуального общения многие специалисты занима-

ются уже многие годы. На сегодняшний день исследования в данной области

весьма актуальны из-за обширных возможностей коммерциализации различных видов человеческой деятельности. Система может заменить как операторов технической поддержки, так и менеджеров по продажам. Диалоговые системы могут разрабатываться как с применением методов искусственного интеллекта, так и без них. Проблемой при разработке диалоговых систем является сложность их обучения; оно требует значительного количества вычислительных ресурсов, а также большого объема обучающих данных [1]. При обучении также не учитывается контекст и смысл реплик, что временами приводит к неожиданным результатам. Поэтому в рамках представленного исследования была поставлена цель – разработать простую архитектуру для быстрых и эффективных диалоговых систем.

Поведение виртуального собеседника можно описать автоматной моделью с соответствующими состояниями. Контекстом подобного диалога является как история общения, так и все состояния, через которые прошел собеседник в результате общения с виртуальной системой. Каждое состояние автомата возможно представить фреймом, полно описывающим текущее состояние и возможные переходы. Это системы с закрытой областью, ориентированные на решение задачи, так как фреймы описывают полно текущее состояние, и невозможно описать все возможные ситуации диалога. Рассматри-

ваемые алгоритмы обучения дотраивают автомат, по которому происходило общение в диалоге.

Материалы и методы решения задачи

Основой при разработке описываемых далее алгоритмов является определение подходящих состояний автомата для последующего сопоставления текстов на естественных языках, что является нетривиальной задачей. Структура естественных языков допускает множество неоднозначностей при попытке определить смысл текста при помощи алгоритмических методов, поэтому анализ предложений является трудоемким процессом.

Для работы с текстом используют специальные библиотеки, такие как spaCy [2] или OpenNLP [3]. Программные компоненты содержат в своем составе широкий спектр инструментов для работы с текстом в процессе обработки естественных языков: уже готовые токенизаторы, синтаксические анализаторы и многое другое. Проблема состоит в том, что для качественной работы программных компонент необходим большой объем данных. Такие программные инструменты требуют ручного обучения и тяжело контролируются, что влечет дополнительные расходы на содержание специалистов, способных построить и сопровождать инфраструктуру для автоматизации отделов технической поддержки. Функционал часто избыточен, если требуется только сравнение текста. В этом случае возможно

использовать алгоритм, основанный на подсчете редакционного расстояния (расстояния Левенштейна).

Описанные в статье алгоритмы сопоставляют наиболее похожие слова из двух текстов и подсчитывают средний процент совпадений. Такой подход обеспечивает возможность приемлемой работы на языках со свободным порядком слов, к которым относится и русский язык.

Задачу сопоставления текстов можно разбить на несколько подзадач. Первоначально требуется избавиться от лишней неоднозначности в тексте, не очень сильно влияющей на смысл текста – то есть нормализовать текст. Следующим шагом нужно дать оценку схожести произвольных строк – это и есть алгоритм подсчета редакционного расстояния с небольшими изменениями. На заключительном этапе проводится сопоставление наиболее схожих слов на основе оценок схожести – это задача о назначениях, и решать ее в описанных ниже алгоритмах предложено при помощи Венгерского алгоритма, сложность которого полиномиальна.

Венгерский алгоритм легко расширяется на случай решения проблемы оценки расстояний для текстов с различным количеством слов. Для слов без пары необходимо принять за редакционное состояние количество символов, входящих в это слово. Таким образом алгоритм упрощается без потери качества обработки. В процессе исследования было проведено сравнение производительности трех реализаций: комбинаторного для предложений, комбина-

торного для слов и Венгерского алгоритмов.

Комбинаторная реализация сопоставления по словам показывает неудовлетворительное качество для длинных предложений, однако является устойчивой к опечаткам и показывает хороший результат. Асимптотика данного алгоритма представляется факториальной функцией, что делает его неприемлемым для практического использования [4]. Сопоставление по предложениям не отвечает требованиям качества, поскольку очень высок процент ложных срабатываний, сложность остается факториальной, но алгоритм может работать для текстов больших объемов. Венгерский алгоритм позволил обойти ограничение по времени и обрабатывать тексты большого объема без потери качества.

Алгоритм обучения по истории диалогов

Диалоговая система, которая заменяет оператора, может быть обучена на истории диалогов. Алгоритм обучения выявляет деревья в диалогах и создает эквивалентный автомат. Во время работы алгоритм пытается минимизировать количество деревьев и состояний: происходит поиск по уже имеющимся состояниям. Несколько подряд идущих сообщений от оператора или собеседника соединяются в одно сообщение, если интервал времени между ними небольшой (промежуток времени задается отдельно). Необходимость такого объединения продиктована тем, что люди при переписке в реальном времени часто могут разбивать свои мысли на не-

сколько сообщений, хотя эти сообщения относятся к одному контексту [5].

На рис. 1 представлена схема алгоритма проверки существования в автомате подходящего состояния для реплики.

Алгоритм работает со всей историей и можно принять, что первым сообщением всегда является начальное. Сначала проводится поиск корня, удовлетворяющего условию.

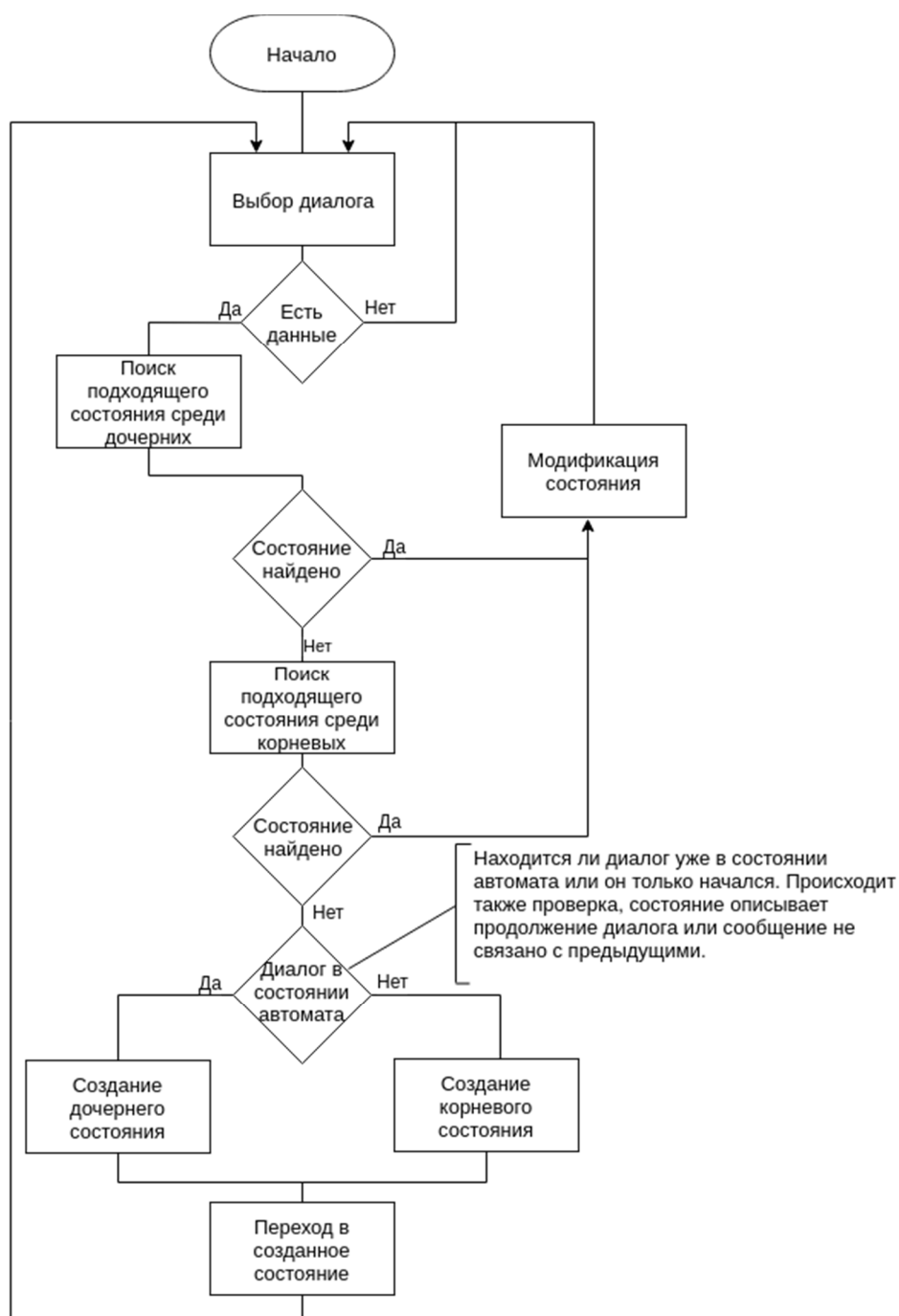


Рис. 1. Схема алгоритма обучения по истории диалогов

Fig. 1. Scheme of learning algorithm on the history of dialogues

Если корень найден, то следующее сообщение будет проверяться только среди узлов, дочерних тому, в которое они вошли, иначе создается новое дерево и проверок больше не происходит.

В тех случаях, когда такое состояние не найдено, оно будет создано диалоговой системой. Если подходящее состояние уже существует, но редакционное расстояние не равно нулю, то происходит его модификация с учетом информации, полученной из текущей реплики. Если же имеется полностью эквивалентное состояние, то никаких операций производить не требуется.

Алгоритм выполняется раз за разом для каждого нового диалога и для каждой реплики в нем. В результате работы алгоритма должен получиться лес из деревьев, каждое дерево которого разветвляется на возможные варианты развития диалогов.

Алгоритм обучения в режиме реального времени

Современные диалоговые системы в текущем состоянии их развития не способны заменить человека с приемлемым качеством реплик, поэтому алгоритм предполагает совместную работу диалоговой системы и оператора. Оператор будет контролировать процесс обучения и результаты.

Диалоговая система должна взять на себя взаимодействие с пользователем по типовым вопросам, которые предусмотрены сценарием. По мере обучения системы сценарий будет расширяться, и роль оператора будет по-

степенно уменьшаться. Оператор также выполняет роль модератора, в тех случаях, когда не используется какая-либо автоматизированная система модерации входящих сообщений.

В тот момент, когда бот не знает ответа на реплику пользователя, в диалог включается оператор. Диалоговая система анализирует реплику пользователя и ответ на нее оператора. На основе этих данных создается дополнительное состояние в автомате. Для того, чтобы не потерять контекст диалога, состояние должно быть связано с предыдущим и не является начальным. Если реплика является первой в диалоге, то будет создано начальное состояние автомата. После создания нового состояния конечный автомат переходит в это состояние. Затем цикл обучения повторяется до тех пор, пока диалог не вернется в уже известное состояние или не будет инициирован с самого начала.

Вопрос, который не требует понимания контекста диалога, можно отметить как начальный узел диалога. Тогда вопросы, которые никак не связаны с текущим контекстом, будут обрабатываться в любой точке диалога [6]. Существует возможность улучшить реализацию с помощью конечного автомата с магазинной памятью и ограниченным размером стека для переключения между контекстами диалога. Возможность запоминания контекста позволит возвращаться к прерванным диалогам в случае переключения контекста. Соответствующая схема алгоритма представлена на рисунке 2.

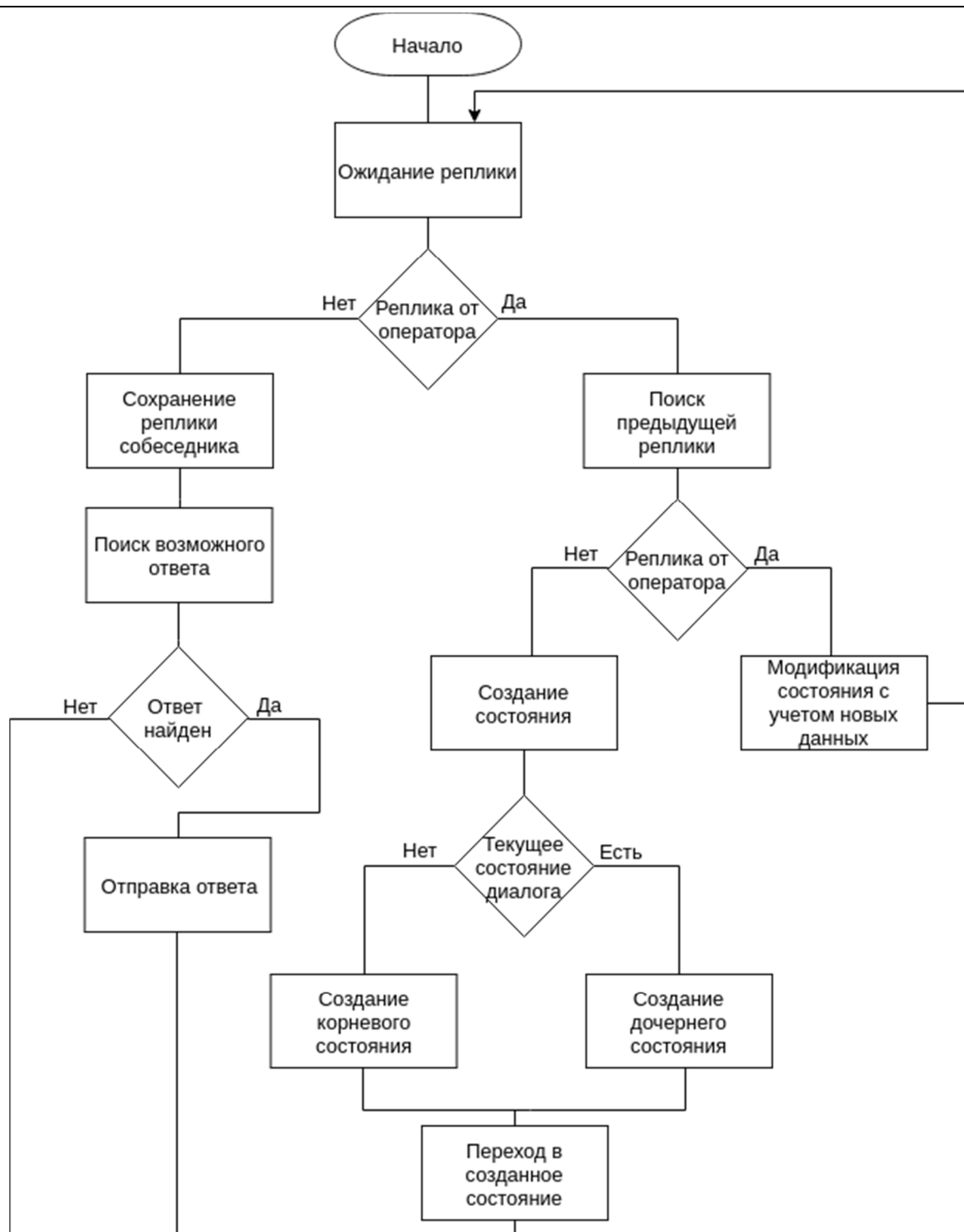


Рис. 2. Схема алгоритма обучения в режиме реального времени

Fig. 2. Diagram of the learning algorithm in real-time

Из схемы видно, что обучение работает только случае, когда в диалог включается оператор. В остальное время обучения не происходит. Это позво-

ляет сократить время на обработку входящих сообщений, сохранив при этом качество обучения.

Результат обучения

Алгоритмы реализованы на языке Python с использованием модуля для подсчета редакционного расстояния и сравнения строк. Результаты были про-

тестированы на реальных данных истории диалогов отдела технической поддержки.

Ниже представлена программная реализация алгоритма обучения по истории диалога:

```
def teach_by_history(self):
    for dialog in self.dialogs:
        prev_replica = None
        prev_state = None
        answer = ''
        condition = ''
        l = len(dialog)
        for index, replica in enumerate(dialog):
            self.processed += 1
            if len(replica['message']) == 0:
                continue
            if replica['inbox']:
                if condition == '':
                    condition = replica['message']
                elif prev_replica != None and self.is_different_dialogs(prev_replica, replica):
                    condition = replica['message']
                prev_state = None
                m = self.find_state('#{none}', prev_replica['message'], x, y, prev_state, True)
            else:
                condition += ' ' + replica['message']
        else:
            if index < (l - 1):
                next_replica = dialog[index + 1]
            else:
                next_replica = None
            if prev_state == None or self.is_different_dialogs(prev_replica, replica):
                if next_replica != None and next_replica['inbox']:
                    answer = replica['message']
                    m = self.find_state(answer, condition, x, y, prev_state, True)
                    prev_state = m
                    condition = ''
                else:
                    if next_replica != None and next_replica['inbox']:
                        # создание соединения
                        answer = replica['message']
                        m = self.find_state(answer, condition, x, y, prev_state, False)
                        prev_state = m
                        condition = ''
                    else:
                        # соединить ответы
                        answer += ' ' + replica['message']
            prev_replica = replica
```

При работе алгоритма осуществляется перебор всех состояний, в которые может быть осуществлен переход, поэтому с увеличением размера обучающей выборки время обучения на каждом последующем диалоге возрастает. Сложность алгоритма стремится к $O(n)$, где n количество начальных состояний автомата. Для сложных диалоговых систем необходимо усовершенствовать реализацию, применив хеширование к сортировке состояний диалога для ускорения поиска подходящего перехода.

Для небольших фреймов с количеством состояний, не превышающим 250, время перебора незначительно относительно времени работы алгоритма сопоставления текстов в узлах состояний. Наиболее затратной операцией является сопоставление слов в текстах.

Такая сложность позволяет строить диалоговые системы на компьютерах среднего ценового диапазона и не требует какого-либо специального оборудования для обучения. Такая нетребовательность к ресурсам расширяет сферу применения диалоговых систем и дает возможность использовать их для нужд малого бизнеса, то есть является экономически выгодным решением: так поиск состояния в диалоговой системе из 150 узлов с самым длинным текстом из 1000 символов займет $15 \cdot 108$ операций, что займет одну-две секунды на процессоре Intel Pentium 4 (6 GFlops) [7].

На рисунке 3 представлена форма отображения результата обучения системы по истории диалога с ручным форматированием расположения блоков для наибольшей наглядности.



Рис. 3. Форма отображения результата обучения системы

Fig. 3. The form of displaying the result of training system

По рисунку 3 видно, что велись несвязанные диалоги, так как объединение деревьев минимально. Темным цветом показаны начальные состояния ав-

томата, блоки белого цвета отображают внутренние состояния автомата, стрелки – переходы между состояниями. Каждый диалог представляет собой ли-

нейную последовательность блоков один под другим. Одинаковые диалоги объединились между собой с разветвлениями в местах, где существовали различия.

Представление диалога в виде блок-схемы закладывает возможность дальнейшего расширения диалоговой системы за счет модификации результатов человеком, ответственным за обучение

системы. Помимо этого, такое представление позволяет тонко настроить поведение системы, что улучшает опыт взаимодействия пользователя с системой.

На рисунке 4 представлена часть реального результата обучения системы по истории диалога с ручным форматированием расположения блоков для наибольшей наглядности.

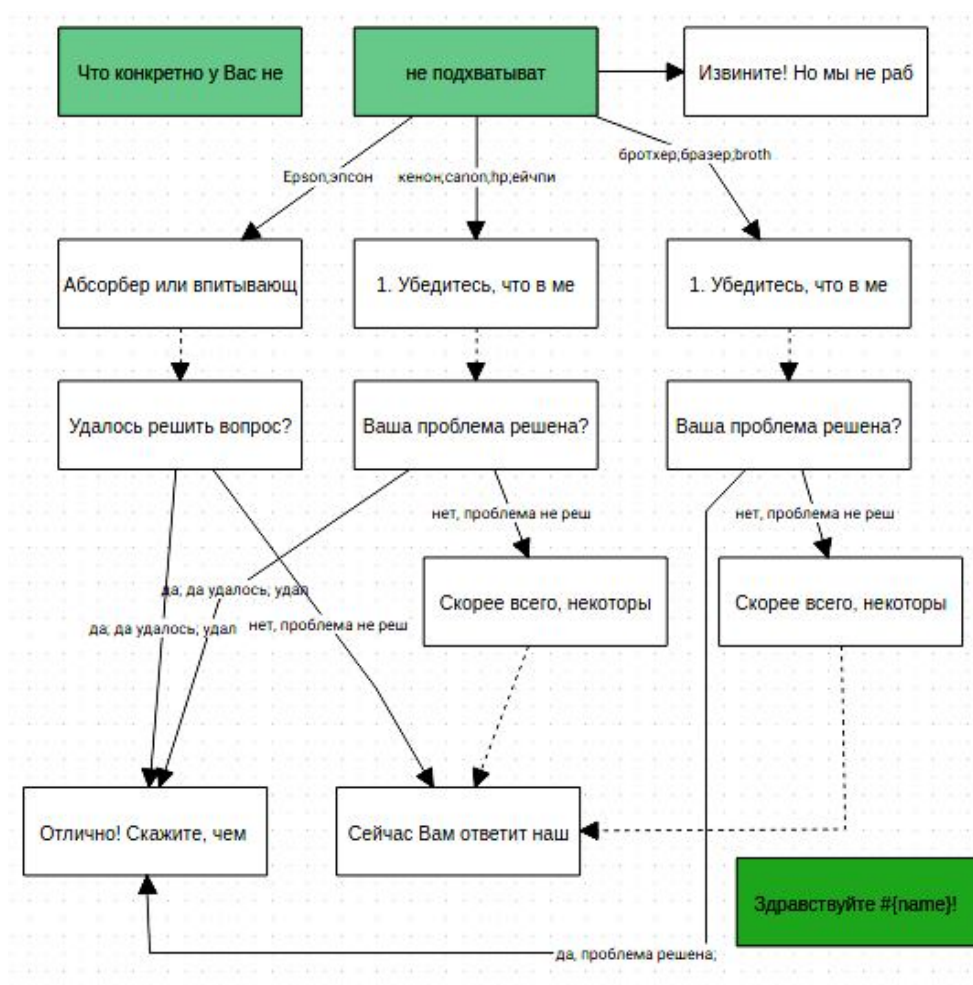


Рис. 4. Реальный результат обучения системы (снимок с экрана)

Fig. 4. Real system learning result (screenshot)

Следует отметить, что тестирование проходило на реальных диалогах и схема включает оригинальную орфо-

графию. Схема построена автоматически реализацией алгоритма обучения на ресурсе <https://salebot.pro>. Рисунок 4 яв-

ляется снимком экрана рабочей поверхности системы разработки диалоговых систем Salebot.pro, в которой был реализован предложенный алгоритм автоматизированного обучения. Текст реплик в блоках на рисунке 4 отображается не полностью, поэтому для просмотра необходимо использовать курсор.

Тестирование результатов обучения на реальных диалогах подтвердило жизнеспособность подхода и его преимущества по сравнению с обучением на предварительно размеченных данных. В случае с обучением на реальных данных сокращается время работы над моделью – изменения можно применять сразу после проверки модели на адекватность человеком, причем оператору не требуется специальная квалификация [8]. С этой стороны реализуемый подход показал свое преимущество перед методами обучения с учителем (подход, используемый Spacy и OpenNLP).

Результаты и их обсуждения

Алгоритмы обучения значительно упрощают создание диалоговых систем. Описанные алгоритмы являются автоматизированными, а не автоматическими, так как после обучения требуется ручная проверка результатов, поскольку они не способны определить, какое из создаваемых состояний может быть начальным, так как они не анализируют контекст. За начальные состояния принимаются только те из них, с которых начинался диалог. Если количество диалогов значительно, а их глубина невелика, то алгоритм показывает лучшие

результаты обучения. После обучения необходимо в ручном режиме проверить результаты и выбрать те состояния диалога, которые не связаны с предыдущими репликами. Такие состояния могут быть назначены начальными состояниями диалога.

В процессе выполнения алгоритм запоминает все ошибки, опечатки и неточности, которые были допущены оператором. Все они попадут в схему диалога и их необходимо будет исправлять. К примеру, если в диалоге фигурировало имя собеседника, то обращение в других диалогах будет также по имени, поэтому после обучения необходимо выделить изменяемые сущности и значения, получаемые извне в ручном режиме. Подобные ситуации также можно исправить с помощью подходов NER.

Обучение идет только по истории диалога, фактор творчества отсутствует, следовательно, пока алгоритм не встретит неизвестную ситуацию, он не научится ее разрешать. При работе диалоговой системы совместно с оператором данная особенность не существенна и со временем участие оператора требуется все реже. Один оператор может отвечать за множество диалоговых систем, что уменьшает штат сотрудников, требуемый для обслуживания диалоговых систем.

Положительной стороной данного алгоритма является то, что он не является “черным ящиком” – на него можно повлиять, представив автомат в виде схемы, состоящей из блоков, соединенных связями. Представленная особен-

ность является решающей в выборе данного алгоритма к использованию. Вероятность худшего случая, когда алгоритм обучения может навредить обучаемой системе, минимальна, так как в нем только повторяются действия оператора, и весь результат обучения виден и может быть либо исправлен, либо отменен.

Во время обучения все реплики собеседника сохраняются в состояниях. Это порождает ряд проблем – необходимо исключать из обучения реплики, содержащие конфиденциальную информацию. Для этого можно использовать методы распознавания именованных сущностей NER (Named Entity Recognition) [9, 10, 11], либо ручную модерацию. Представляет большой интерес интеграция предложенного в настоящей работе подхода с методами NER, реализованными в нейроподобных структурах [12, 13], в том числе на основе использования метода глубокого обучения искусственных нейронных сетей [14], что позволит повысить эффек-

тивность взаимодействия с диалоговой системой.

Выводы

Предложенный в настоящей работе подход, основанный на обучении без учителя, является гибким и позволяет достигнуть наилучших результатов в совокупности с другими подходами. У предложенного алгоритма имеется большой потенциал для расширения, что является его важным преимуществом. На основании проведенного анализа предлагается использовать предложенные алгоритмы совместно. На первом этапе создания диалоговой системы необходимо проводить ее обучение на истории диалогов или заранее написанном сценарии, а затем непрерывно обучать в режиме реального времени. Предполагается, что дальнейшее внедрение последних достижений в области искусственных нейронных сетей при распознавании именованных сущностей позволит получить простые и эффективные реализации диалоговых систем.

Список литературы

1. Провотар А.И., Ключко К. А. Особенности и проблемы виртуального общения с помощью чат-ботов // Информационные технологии и компьютерная техника. Научные работы ВНТУ. 2013. № 3. С. 1-6.
2. Training spaCy's Statistical Models. URL: <https://spacy.io/usage/training> (дата обращения: 07.05.2019).
3. Apache OpenNLP Developer Documentation. URL: <https://opennlp.apache.org/docs/1.9.0/manual/opennlp.html> (дата обращения: 07.05.2019).
4. Задача о редакционном расстоянии, алгоритм Вагнера-Фишера. URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Задача_о_редакционном_расстоянии,_алгоритм_Вагнера-Фишера (дата обращения: 07.05.2019).

5. Ramsay A. Discourse. In Mitkov, R. (Ed.). The Oxford Handbook of Computational Linguistics. Oxford University Press, USA, 2003. 717 p.
6. Traum D., Larsson S. The information state approach to dialogue management // In J. van Kuppevelt & R. Smith (Eds.), Current and new directions in discourse and dialogue. Springer, 2003. P. 325–354.
7. Computing Power Throughout History. URL: https://www.alternatewars.com/BBOW/Computing/Computing_Power.htm (дата обращения: 07.05.2019).
8. Автоматизированное обучение. URL: <https://salebot.pro/articles/9> (дата обращения: 07.05.2019).
9. Спирин Д.В., Брежнев О.С., Баринов А.Д. Алгоритм автоматизированного обучения // Сборник статей II Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. С. 49-53.
10. A multi-task approach for named entity recognition in social media data / G. Aguilar, S. Maharjan, A. Pastor Lopez-Monroy, T. Solorio // In Proceedings of the 3rd Workshop on Noisy User-generated Text, 2017. P. 148–153.
11. Daniken P., Cieliebak M. Transfer learning and sentence level features for named entity recognition on tweets // In Proceedings of the 3rd Workshop on Noisy User-generated Text, 2017. P. 166–171.
12. Neural Architectures for Named Entity Recognition / G. Lample, M. Ballesteros, S. Subramanian, K. Kawakami, C. Dyer // In Proceedings of NAACL-HLT 2016, San Diego, California, June 12-17, 2016. P. 260–270.
13. Strakova J. Neural Network Based Named Entity Recognition. – Institute of Formal and Applied Linguistics, Prague. 2017. 120 p.
14. Akkaya E.K. Deep neural networks for named entity recognition on social media. Computer Engineering Dept., Hacettepe University. Beytepe-Ankara, Turkey, 2018. 126 p.

Reference

1. Provotar A. I., Klochko K. A. Osobennosti i problemy virtual'nogo obshcheniya s pomoshch'yu chat-botov [Features and problems of virtual communication using chat bots]. *Informatsionnye tekhnologii i komp'yuternaya tekhnika. Nauchnye raboty VNTU. = Information technologies and computer equipment Scientific works VNTU*, 2013, no. 3, pp. 1-6 (In Russ.).
2. [Training spaCy's Statistical Models]. Available at: <https://spacy.io/usage/training> (accessed 07.05.2019).
3. Apache OpenNLP Developer Documentation. Available at: <https://opennlp.apache.org/docs/1.9.0/manual/opennlp.html> (accessed 07.05.2019).
4. Zadacha o redaktsionnom rasstoyanii, algoritm Vagnera-Fishera [The task of the editorial distance, the algorithm of Wagner-Fisher]. Available at: The access method is free: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Task_about_education_distance,_algorithm_Wagner-Fisher (accessed 07.05.2019) (In Russ.).

5. Ramsay A. Discourse. In Mitkov, R. (Ed.). The Oxford Handbook of Computational Linguistics. Oxford University Press, USA, 2003, 717 p.
6. Traum D., Larsson S. The information state approach to dialogue management. In J. van Kuppevelt & R. Smith (Eds.), Current and new directions in discourse and dialogue Springer, 2003, p. 325–354.
7. Computing Power Throughout History Available at: [https:// www.alternatewars.com/BBOW/ Computing / Computing_Power.htm](https://www.alternatewars.com/BBOW/Computing/Computing_Power.htm) (accessed 07.05.2019).
8. Avtomatizirovannoe obuchenie. Available at: The access method is free: <https://salebot.pro/articles/9> (accessed 07.05.2019) (In Russ.).
9. Spirin D.V., Brezhnev O. S., Barinov A. D. [Algorithm of automated learning]. *Sbornik statei II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference]. Penza, 2018, pp. 49-53 (In Russ.).
10. Aguilar G., Maharjan S., Pastor Lopez-Monroy A., Solorio T..A multi-task approach for named entity recognition in social media data. In Proceedings of the 3rd Workshop on Noisy User-generated Text, 2017, pp. 148–153.
11. Daniken P., Cieliebak M. Transfer learning and sentence level features for named entity recognition on tweets. In Proceedings of the 3rd Workshop on Noisy User-generated Text, 2017, pp. 166–171.
12. Lample G., Ballesteros M., S Subramanian., Kawakami K., Dyer C. Neural Architectures for Named Entity Recognition. In Proceedings of NAACL-HLT 2016, San Diego, California, June 12-17, 2016, pp. 260–270.
13. Strakova J. Neural Network Based Named Entity Recognition. Institute of Formal and Applied Linguistics, Prague, 2017, 120 p.
14. Akkaya E.K. Deep neural networks for named entity recognition on social media. Computer Engineering Dept., Hacettepe University, Beytepe-Ankara, Turkey, 2018. 126 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Дмитрий Владимирович Спирин, аспирант кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: spirin.dmitrij@list.ru

Dmitriy V. Spirin, Post-Graduate Student, Department of Computing Engineering, Penza State University, Penza, Russian Federation
e-mail: spirin.dmitrij@list.ru

Олег Сергеевич Брежнев, инженер-программист кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: oleg-423@yandex.ru

Oleg S. Brezhnev, Software Engineer, Department of Software and Computer Applications, Penza, Russian Federation
e-mail: oleg-423@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-100-112>

Вариант организации многопоточной обработки конфиденциальных данных на базе клеточных автоматов

А. Л. Марухленко ¹✉, А. В. Плугатарев ¹, М. О. Таныгин ¹,
Л. О. Марухленко ¹, Д. О. Бобынцев ¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: proxy33@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке системы многопоточной обработки на основе алгоритма шифрования с использованием клеточных автоматов и исследовании статистических показателей производительности в зависимости от аппаратной составляющей и величины входного блока, а также разработке рекомендаций для повышения криптостойкости метода.

Методы. Рассмотрена математическая модель метода шифрования с использованием плавающего окна на базе клеточных автоматов [3]. Для исследования быстродействия процесса обработки конфиденциальных данных разработан вариант организации структуры программного модуля с расширенным блоком настроечных параметров, определяющих размерность матрицы, строку активации битовой окрестности обрабатываемых элементов, число параллельных вычислений (тредов) и правило расширения граничных элементов матрицы. Предложен метод формирования графической зависимости времени обработки от исходных параметров, область применения которого возможна как для обработки отдельных файлов, так и непрерывных потоков данных абонентов вычислительной сети.

Результаты. Разработан криптографический модуль, реализующий метод шифрования на базе клеточных автоматов, особенностью которого является многопоточный режим работы и динамическое управление блоком исходных параметров. Сформулированы рекомендации по установке окрестности активных элементов матрицы и числу потоков с учетом архитектуры центрального процессора. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие полноту и корректность предложенных решений. Показана целесообразность использования высокоскоростных накопителей на жестком диске и сохранение результатов шифрования в асинхронном сегментированном режиме с привязкой результата к рабочему тредам.

Закключение. Предложенный вариант организации системы обработки конфиденциальной информации в виде программного модуля с учетом особенностей аппаратного обеспечения позволяет оптимизировать скорость обработки, а соблюдение рекомендаций по расширению окрестности при блочном преобразовании позволяет повысить криптостойкость алгоритма шифрования на базе клеточных автоматов с плавающим окном.

Ключевые слова: клеточный автомат; шифрование данных; параллельные вычисления; криптография; системный анализ; информационная безопасность.

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

Для цитирования: Вариант организации многопоточной обработки конфиденциальных данных на базе клеточных автоматов / А. Л. Марухленко, А. В. Плугатарев, М. О. Таныгин, Л. О. Марухленко, Д. О. Бобынцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 100-112. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-100-112>.

Статья поступила в редакцию 23.04.2019

Статья подписана в печать 30.05.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-100-112>

A version of Organization of Multithread Processing of Confidential Data on the Basis of Cellular Automata

Anatoliy L. Marukhlenko ¹✉, Aleksey V. Plugatarev ¹, Maksim O. Tanygin ¹,
Leonid O. Marukhlenko ¹, Denis O. Bobyntsev ¹

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

✉ e-mail: proxy33@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a multithread processing system based on an encryption algorithm using cellular automata and to study statistical performance indicators depending on the hardware components and the size of the input block, and to develop recommendations for improving the cryptostrength of the method.

Methods. A mathematical model of the encryption method using a floating window based on cellular automata was considered [3]. To study the speed of confidential data processing, there was developed a variant of the organization of the structure of the software module with an extended block of setting parameters that determine the dimension of the matrix, the line of activation of the bit neighborhood of the processed elements, the number of parallel computations (threads) and the rule of expansion of the boundary elements of the matrix. A method for the development of the dependence curve of the processing time and initial parameters that can be applied both to process individual files and continuous network subscriber data flow, is proposed.

Results. The cryptographic module implementing the encryption method on the basis of cellular automata, which specific feature is a multithread mode of operation and dynamic control of the block of initial parameters, was developed. Recommendations for setting the neighborhood of the active elements of the matrix and the number of threads taking into account the architecture of the CPU were formulated. Experimental studies were conducted to confirm the completeness and correctness of the proposed solutions. The expediency of using high-speed hard disk drives and saving the results of encryption in asynchronous segmented mode with working thread-bind results was revealed.

Conclusion. The proposed version of the organization of the confidential data processing system in the form of a software module, taking into account the features of the hardware, allows optimization of the processing speed, and the compliance with the recommendations for the expansion of the neighborhood in the block transformation can improve the cryptographic algorithm based on cellular automata with a floating window.

Keywords: cellular automaton; data encryption; parallel computing; cryptography; system analysis; information security.

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

For citation: Marukhlenko A. L., Plugatarev A.V., Tanygin M. O., Bobyntsev D. O. A version of Organization of Multithread Processing of Confidential Data on the Basis of Cellular Automata. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 100-112 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-100-112>.

Received 23.04.2019

Accepted 30.05.2019

Введение

Стремительное развитие информационных технологий предполагает непрерывное совершенствование средств, обеспечивающих информационную безопасность конфиденциальных данных [1]. Отдельное внимание уделяется защите информации от несанкционированного доступа с использованием современных криптографических методов и системного анализа в распределенных системах, работающих в масштабе реального времени [2]. Как правило, программно-аппаратные решения по обеспечению комплексной криптозащиты отличаются сложностью интеграции в состав локальной вычислительной сети, а также предполагают сопровождение с привлечением экспертов в области информационной безопасности [3, 4]. Особенный интерес для защиты конфиденциальных данных представляет метод блочной обработки, основанный на алгоритме клеточного шифрования с плавающим окном. Данный метод имеет перспективы повышения криптостойкости при поддержании высокой скорости обработки данных за счет использования параллельных вычислений.

Задача многопоточной обработки конфиденциальных данных

Задачу обеспечения защиты от несанкционированного доступа в рамках рассматриваемого метода можно описать последовательностью основных этапов, а именно: конфиденциальные данные представляются в виде двоич-

ной матрицы, блок шифрования представляет плавающее окно, движение по матрице которого определяется входными параметрами и режимом обработки. Как правило, при обработке (шифровании) он находится в левом верхнем углу исходной матрицы, содержание этого блока выписывается в строку в соответствии с маршрутом обхода окрестности (соседних битов). Эта последовательность заменяется в соответствии с функцией переходов. Полученная шифр-последовательность сворачивается в блок в соответствии с заданным маршрутом и перезаписывается поверх элементов исходной матрицы. Далее происходит смещение и итеративный процесс повторяется до обработки всей матрицы.

Материалы и методы решения задачи

При разработке программного модуля необходимо обеспечить чтение файла с носителя или сетевого интерфейса с учетом аппаратных особенностей автоматизированной системы, произвести формирование и обработку исходной матрицы заданной ширины в соответствии с размером плавающего окна и правилами расширения матрицы для граничных элементов.

Особенностью предлагаемой схемы шифрования потоков данных с использованием параллельных вычислений на базе клеточных автоматов является использование независимых тредов. С их помощью происходит рациональное использование вычислительного ресурса

центрального процессора при обработке на одном компьютере или распределение процесса обработки с использованием сетевых терминалов [5-7].

Вариант построения системы

На рисунке 1 показан принципиальный вариант взаимодействия элементов проектируемой системы.

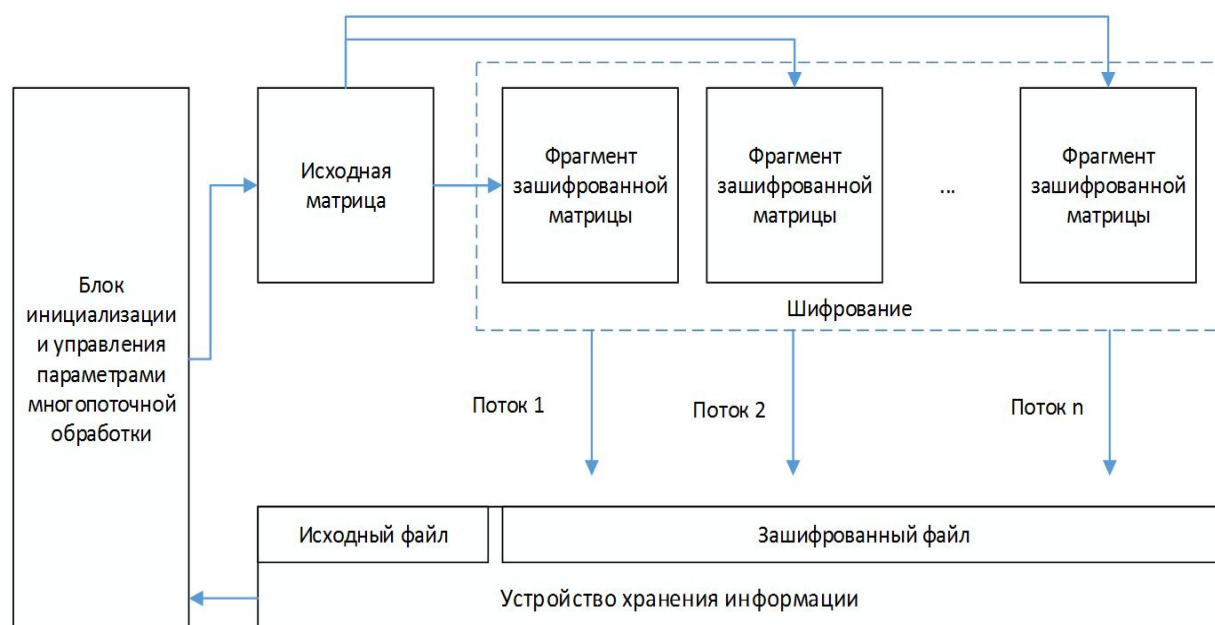


Рис. 1. Схема организации многопоточной обработки

Fig. 1. The scheme of the organization of multi-threaded processing

Зашифрованная матрица формируется поблочно, в процессе движения плавающего окна и в случае использования сегментации может быть представлена набором файлов. Это значит, что готовые блоки зашифрованного файла хранятся в оперативном запоминающем устройстве и ждут окончания процесса шифрования [8]. В зависимости от режима сохранения результирующей матрицы возникает целесообразность использования нескольких накопителей данных, т.к. при одновременной записи несколькими потоками слабым звеном в цепочке производитель-

ности становится устройство хранения информации [9].

Математическая модель алгоритма

Для наглядного описания работы метода рассмотрим работу с двумерной матрицей. Размер блока шифрования (m_1, m_2) может задаваться произвольно, а количество столбцов матрицы определяется числом блоков, записанных в алфавите $A=\{0,1\}$. Число строк матрицы определяется размером исходных данных, а в случае сетевого потока зависит от сеанса взаимодействия абонентов вычислительной сети [10]. Число столбцов

зависит от длины исходной информации и определяется по формуле

$$N_2 = q \cdot m_2 + 1,$$

где q – неполное частное в равенстве $T = k \cdot q + r$, $0 \leq r < k$; $k = m_1 \cdot m_2$ – площадь блока; T – длина исходного текста, а r – остаток от деления.

Клеточным автоматом с плавающим окном называют совокупность:

$$CA_o = <$$

$$Z^n, (N_1, \dots, N_n), A, (m_1, \dots, m_n), \Psi, L >,$$

где Z^n – размерность клеточного автомата ($n = 1, 2, 3$);

$(N_1, \dots, N_n)$ – размер таблицы;

$(m_1, \dots, m_n)$ – размер блока шифрования;

Ψ – таблица функций переходов;

L – маршрут обхода блока шифрования клеточного автомата с плавающим окном, причем, выполняются равенства $N_1 = m_1, \dots, N_{n-1} = m_{n-1}$, а $N_n = q \cdot m_n + 1$, где q – неполное частное в равенстве $T = k \cdot q + r$, $0 \leq r < k$, $k = m_1 \cdot \dots \cdot m_n$ – число клеток в блоке шифрования; T – длина исходного текста, а r – остаток от деления.

Исходный текст записывается последовательно по слоям в таблицу исходного текста. В последнем слое будет заполнено только r клеток. Оставшиеся клетки заполняются либо нулями, либо единицами. Процесс шифрования состоит в следующем: блок шифрования находится в начале таблицы с исходным текстом, содержание этого блока выписывается в строку в соответствии с маршрутом обхода L . Эта последовательность заменяется в соответствии с

функцией переходов Ψ . Полученная шифр – последовательность сворачивается в блок в соответствии с маршрутом L . Исходный блок заменяется на полученный. Блок шифрования сдвигается на одну позицию по таблице данных и процесс повторяется. Процесс шифрования завершается, когда блок шифрования не имеет возможности сдвинуться в новое положение. При дешифровании плавающее окно передвигается в противоположную сторону, начиная с последнего столбца (столбцы в функции переходов меняются местами). В ходе криптоанализа установлено, что для повышения стойкости метода следует производить расширение окрестности матрицы вместе с правилом ее дополнения на базе функции, определяющей состояние дополнительных ячеек для граничных элементов [11]. Также целесообразно применение хеш-функции, определяющей очередность обработки блоков. Указанные функции являются ключевыми и должны быть известны получателю конфиденциальных данных [12].

Численное моделирование

Разработанный программный модуль показан на рисунке 2. Здесь в верхней части показан блок исходных параметров – правило дополнения матрицы, опциональное ведение лог-файла, правило обхода и размер блока, размерность матрицы (по числу блоков в строке). Слева в столбце показаны состояния зашифрованных блоков в соответ-

ствии с хэш-функцией. Кроме использования таблицы преобразований на базе хэш-функции предусмотрена возможность загрузки пользовательского справочника переходов или его генерация (при отсутствии). В целях исключения ошибки использования неверного

справочника идет сопоставление размера установленного блока и мощности числа переходов [13]. Экспериментальные исследования подтвердили отсутствие зависимости скорости обработки от числа блоков в строке матрицы.

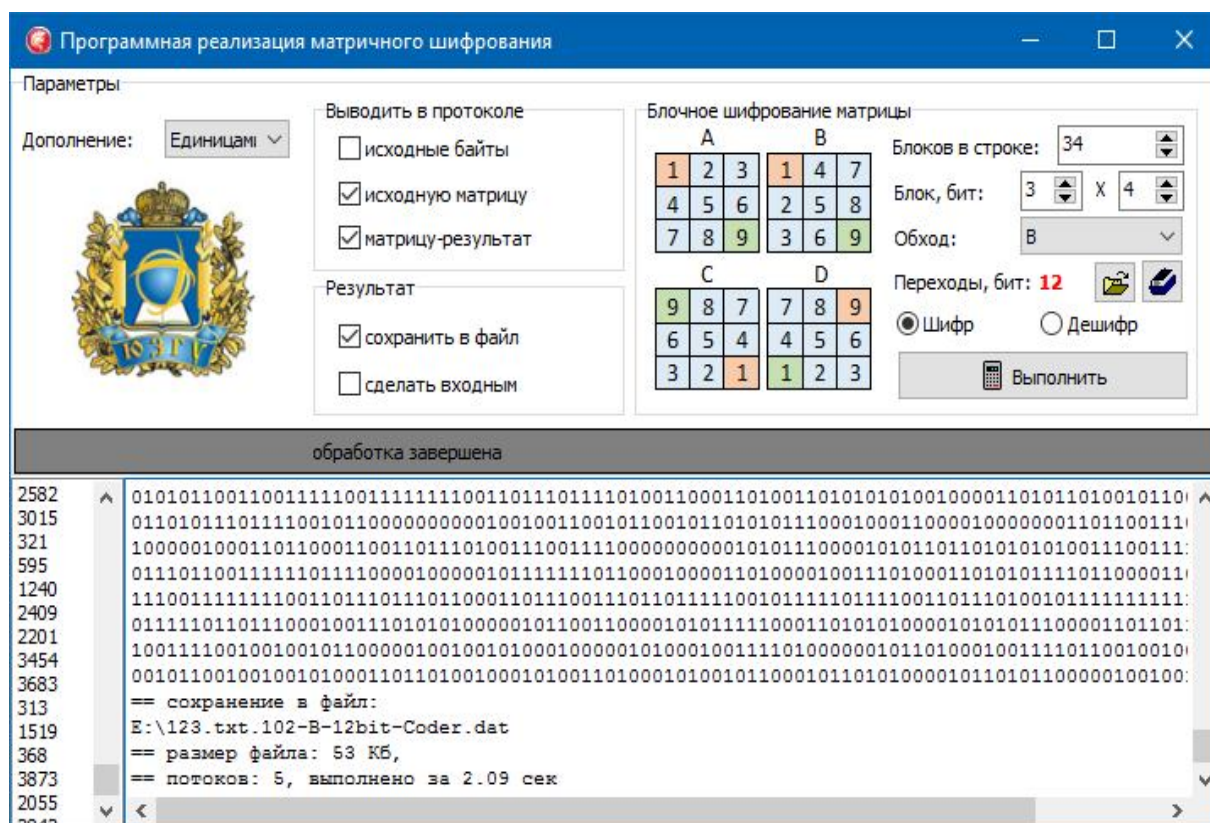


Рис. 2. Интерфейс программного модуля шифрования

Fig. 2. Encryption software interface

Перебор вариантов размеров исходных блоков показал, что скорость обработки матрицы обратно пропорциональна размеру блока. Полученные статистические показатели обработки приведены в таблице, здесь 100% соответствует наиболее продолжительному времени шифрования файла размером 5 Мб, которое составило 23,2 секунды. Исследования производились на персо-

нальном компьютере с аппаратной конфигурацией: CPU Intel i3 8100, HDD ST2000DL003, RAM 32 Гб.

Динамика роста быстродействия обоснована тем, что при увеличении размера блоков, их количество в матрице файла уменьшается, соответственно уменьшается и время захвата, подстановки и перезаписи элементов.

Зависимость времени шифрования от размера блока шифрования
The dependence of the encryption time on the size of the encryption block

Размерность блока (бит)	2x2	3x3	4x4	5x7	7x9
Относительная задержка (%)	100	75.97	61.73	41.01	26.46

Важно учитывать тот факт, что при использовании справочника подстановок, выигрыш по времени обработки достигается при наличии готовой таблицы преобразований, в противном случае время ее генерации может превысить время обработки, т.к. временные задержки на ее формирование растут в геометрической прогрессии при увеличении площади блока [14].

Результаты и их обсуждение

Для оценки зависимости производительности работы разработанной системы от числа параллельных вычислений был активирован режим перебора числа тредов на файлах различного размера. При формировании исходной матрицы использовались блоки 20 и 42 бита. Полученные результаты показаны на рисунке 3.

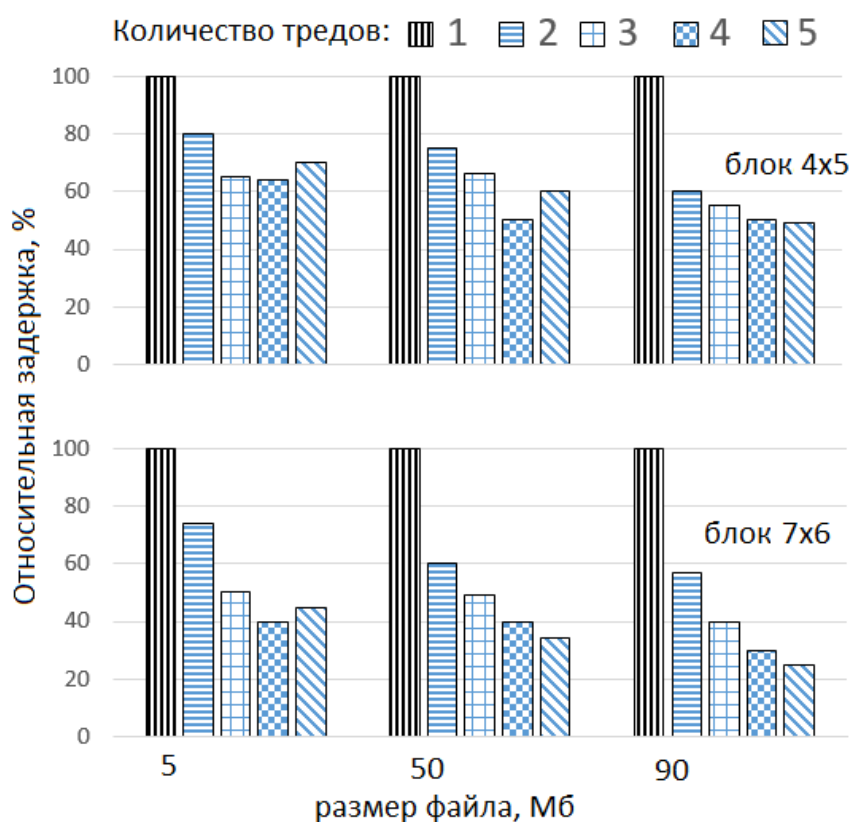


Рис. 3. Результаты исследования в многопоточном режиме

Fig. 3. The research results in multithreaded mode

Для наглядности, здесь по оси ординат указана относительная задержка, 100% соответствует максимальному времени обработки файла указанного размера, таким образом, одинаковая высота столбцов для различных данных не означает совпадение времени обработки.

Из представленных графиков следует, что на базе экспериментального оборудования целесообразно использование не более четырех потоков (процессор имеет четыре физических ядра), так как подавляющее большинство испытаний показало наибольшее быстродействие системы. Использование более пяти потоков не представляет интереса, т.к. показало снижение скорости шифрования в связи с тем, что происходит объединение задач внутри одного физического (логического) процессора и замедление его работы. Таким образом, динамика производительности зависит от архитектуры процессора и загруженности системы в целом. Также из графика следует, что зависимость прироста в скорости многопоточного преобразования зависит от размера файла. Связано это с тем, что этап инициализации и запуска тредов может занимать значительную долю от всего времени обработки, что нецелесообразно при обработке файлов менее 10 Мб. Также следует учитывать размер блока, т.к. он

определяет число перезаписи элементов исходной матрицы, а в случае последовательного алгоритма время «простоя» [15]. Анализ загрузки ресурсов компьютера показал, что слабым звеном в цепи быстродействия является накопитель данных, т.к. он активно используется в момент выгрузки результатов шифрования из оперативной памяти. Вариантом решения данной проблемы является асинхронная запись обработанных сегментов исходной матрицы конфиденциальных данных на независимые устройства хранения информации [16].

Выводы

В ходе работы разработана схема организации многопоточной обработки конфиденциальных данных, сформулированы рекомендации по повышению криптостойкости метода шифрования на базе клеточных автоматов с плавающим окном. Для проведения экспериментальных исследований на основе разработанных теоретических положений синтезирован программный модуль, который с учетом особенностей аппаратного обеспечения вычислительной среды обеспечивает поддержание высокой скорости обработки потока данных. Совокупность полученных результатов подтверждают полноту и корректность предложенных решений.

Список литературы

1. Марухленко А.Л., Мирзаханов П.С. Программный комплекс для моделирования процесса передачи и обработки сетевых потоков данных // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 175-180.

2. Программно-аппаратный комплекс «Токси+метео» для оценки последствий возможных аварий с учетом данных о текущих погодных условиях / А.А. Агапов, И.О. Хлобыстова, С.Л. Марухленко, А.Л. Марухленко, А.С. Софьин // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 1. С. 22-25.

3. Марухленко А.Л., Плугатарев А.В., Марухленко Л.О., Ефремов М.А. Комплексная оценка информационной безопасности объекта с применением математической модели для расчета показателей риска // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 34-40.

4. Dr. Allen Harper, Daniel Regalado, Ryan Linn, Stephen Sims, Branko Spasojevic, Linda Martinez, Michael Baucom, Chris Eagle, The late Shon Harris. Gray Hat Hacking: The Ethical Hacker's Handbook, Fifth Edition. – McGraw-Hill Education, 2018. 640 с.

5. Борзов Д.Б., Чеснокова Е.О., Марухленко А.Л., Аль-Ашвал М.М.Я. Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при двуправленной передаче информации // патент на изобретение RUS 2421805 24.11.2008.

6. Программный модуль для оценки криптостойкости симметричных методов шифрования с использованием параллельных вычислений / В.П. Добрица, А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко, А.В. Плугатарев // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 33-38.

7. Анализ потенциальных уязвимостей и современных методов защиты многопользовательских ресурсов / М.О. Таныгин, А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко, Е.Е. Конорева // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 136-140.

8. Технология и программная реализация программного модуля для локализации потенциально опасных объектов на графической подложке с использованием нейронных сетей / М.О. Таныгин, А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко, А.Н. Романов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 23-28.

9. Администрирование информационных систем / Д.О. Бобынцев, Л.А. Лисицин, А.Л. Марухленко, С.А. Кужелева. Курск, 2019. 201 с.

10. Асютиков А.А., Добрица В.П. Шифрование клеточным автоматом на разбиении по принципу плавающего окна // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 45-50.

11. Безопасность информационных систем / А.Л. Марухленко, М.О. Таныгин, М.А. Ефремов, А.Г. Спеваков; Юго-Зап. гос.ун-т. Курск, 2019. 210 с.
12. Разработка защищенных корпоративных систем на базе клиент-серверной технологии / М.А. Ефремов, Ю.А. Халин, А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко; Юго-Зап. гос.ун-т. Курск, 2018. 176 с.
13. Комплексная оценка информационной безопасности объекта с применением математической модели для расчета показателей риска / М.А. Ефремов, А.Л. Марухленко, А.В. Плугатарев, Л.О. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 34-40.
14. Вариант обеспечения информационной безопасности за счет повышения отказоустойчивости работы аппаратного межсетевого экрана / Л.О. Марухленко, А.Л. Марухленко, К.М. Керимбаева, А.А. Шамина // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2018. С. 10-14.
15. Установление доверительного канала обмена данными между источником и приёмником информации с помощью модифицированного метода одноразовых паролей / М.О. Таныгин, Х.Я. Алшаи, В.А. Алтухова, А.Л. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 63-71.
16. Организация системы сетевого мониторинга и оценки состояния информационной безопасности объекта / А.Л. Марухленко, К.Д. Селезнёв, М.О. Таныгин, Л.О. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. 23(1): С. 118-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-118-129>.

Reference

1. Marukhlenko A.L., Mirzakhanov P.S. Programmnyi kompleks dlya modelirovaniya protsessa peredachi i obrabotki setevykh potokov dannykh [A software package for modeling the process of transmitting and processing network data streams]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering*, 2012, no. 2-3, pp. 175-180 (In Russ.).
2. Agapov A.A., Khlobystova I.O., Marukhlenko S.L., Marukhlenko A.L., Sofin A.S. Programmno-apparatnyi kompleks «Toksi+meteo» dlya otsenki posledstviy vozmozhnykh avarii s uchetom dannykh o tekushchikh pogodnykh usloviyakh [Hardware and software complex “Toxi + meteo” for assessing the consequences of possible accidents taking into account data on current weather conditions]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Labor safety in industry*, 2011, no. 1, pp. 22-25 (In Russ.).

3. Marukhlenko A.L., Plugatarev A.V., Marukhlenko L.O., Efremov M.A. Kompleksnaya otsenka informatsionnoi bezopasnosti ob"ekta s primeneniem matematicheskoi modeli dlya rascheta pokazatelei riska [A comprehensive assessment of the information security of an object using a mathematical model for calculating risk indicators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering*, 2018, vol. 8. no. 4 (29), pp. 34-40 (In Russ.).

4. Dr. Allen Harper, Daniel Regalado, Ryan Linn, Stephen Sims, Branko Spasojevic, Linda Martinez, Michael Baucom, Chris Eagle, The late Shon Harris. Gray Hat Hacking: The Ethical Hacker's Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill Education, 2018, 640 p.

5. Borzov D.B., Chesnokova E.O., Marukhlenko A.L., Al-Ashval M.M.Ya. Ustroistvo poiska nizhnei otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri dvunapravlennoi peredache informatsii. patent na izobretenie [Search device for lower estimation of placement in fully connected matrix systems with bi-directional transmission of information]. Patent for invention RUS 2421805 11.24.2008. (In Russ.).

6. Dobritsa V.P., Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O., Plugatarev A.V. [A software module for assessing the cryptographic strength of symmetric encryption methods using parallel computing]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, 2018, pp. 33-38 (In Russ.).

7. Tanygin M.O., Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O., Konoreva E.E. [Analysis of potential vulnerabilities and modern methods of protecting multi-user resources]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, 2018, pp. 136-140 (In Russ.).

8. Tanygin M.O., Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O., Romanov A.N. [Technology and software implementation of a software module for localizing potentially dangerous objects on a graphic substrate using neural networks]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, 2018, pp. 23-28 (In Russ.).

9. Bobyntsev D.O., Lisitsin L.A., Marukhlenko A.L., Kuzheleva S.A. Administrirovanie informatsionnykh sistem. Kursk, 2019. 201 p. (In Russ.).

10. Asyutikov A.A., Dobritsa V.P. [Encryption with a cellular machine on a partition by the principle of a floating window]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, 2018, pp. 45-50 (In Russ.).

11. Marukhlenko A.L., Tanygin M.O., Efremov M.A., Spevakov A.G. Bezopasnost' informatsionnykh sistem [Security of information systems]. Kursk, 2019, 210 p. (In Russ.).

12. Efremov M.A., Khalin Y.A., Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O. Razrabotka zashchishchennykh korporativnykh sistem na baze klient-servernoi tekhnologii [Development of secure corporate systems based on client-server technology]. Kursk, 2018. 176 p. (In Russ.).

13. Efremov M.A., Marukhlenko A.L., Plugatarev A.V., Marukhlenko L.O. Kompleksnaya otsenka informatsionnoi bezopasnosti ob"ekta s primeneniem matematicheskoi modeli dlya rascheta pokazatelei riska [A comprehensive assessment of the information security of an object using a mathematical model for calculating risk indicators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering*. 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 34-40 (In Russ.).

14. Marukhlenko L.O., Marukhlenko A.L., Kerimbaeva K.M., Shamina A.A. [Variant of ensuring information security by increasing the fault tolerance of the hardware firewall]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, 2018, pp. 10-14 (In Russ.).

15. Tanygin M.O., Alshaya Kh.Ya., Altukhova V.A., Marukhlenko A.L. Ustanovlenie doveritel'nogo kanala obmena dannymi mezhdu istochnikom i priemnikom informatsii s pomoshch'yu modifitsirovannogo metoda odnorazovykh parolei [Establishing a confidence channel for exchanging data between a source and a receiver of information using the modified one-time password method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering*, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 63-71 (In Russ.).

16. Marukhlenko A.L., Seleznev K.D., Tanygin M.O., Marukhlenko L.O. Organizatsiya sistemy setevogo monitoringa i otsenki sostoyaniya informatsionnoi bezopasnosti ob"ekta

[Organization of a network monitoring system and an assessment of the state of information security of an object]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23 (1): 118-129 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-118-129>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Марухленко Анатолий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: proxy33@mail.ru

Anatoliy L. Marukhlenko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: proxy33@mail.ru

Плугатарев Алексей Владимирович, магистрант кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aplugatarev@bk.ru

Aleksey V. Plugatarev, Undergraduate, Information Security Department Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: aplugatarev@bk.ru

Таныгин Максим Олегович, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru

Maksim O. Tanygin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tanygin@yandex.ru

Марухленко Леонид Олегович, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: leonid.marukhlenko@mail.ru

Leonid O. Marukhlenko, Senior Lecturer, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: leonid.marukhlenko@mail.ru

Бобынцев Денис Олегович, кандидат технических наук, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: daniel8728@yandex.ru

Denis O. Bobyntsev, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: daniel8728@yandex.ru

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-113-134>

Применение глубоких нейронных сетей в задаче получения карты глубины из двумерного изображения

Д.И. Михальченко¹ ✉, А.Г. Ивин¹, О.Ю. Сивченко¹, Е.А. Аксаментов¹

¹ Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14 линия, 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: tekatodsham@gmail.com

Резюме

Цель исследования. исследование подходов к генерации карт глубины для проверки и обучения глубоких нейронных сетей. Рассматривается проблема получения информации о расстоянии от камеры до объекта сцены по 2D-изображению при помощи глубоких нейронных сетей без использования стереокамеры.

Методы. Генерация 3D-сцен для обучения и оценки нейронной сети осуществлялась при помощи приложения 3D-компьютерной графики Blender. Для оценки точности обучения было использовано среднеквадратическое отклонение (СКО). Машинное обучение было реализовано при помощи библиотеки Keras, а оптимизация – с использованием подхода AdaGrad.

Результаты. Представлена архитектура глубокой нейронной сети, которая на вход получает три последовательности 2D-изображений из видеопотока 3D-сцены и выдает на выходе предсказанную карту глубины для рассматриваемой 3D-сцены. Описан способ создания обучающих наборов данных, содержащих информацию о глубине карты с использованием программного обеспечения Blender. Рассматривается проблема переобучения, заключающаяся в следующем: созданные модели работают на специально сгенерированных наборах данных, но все еще не могут предсказать правильную карту глубины для случайных изображений. Представлены результаты тестирования актуальных способов создания карт глубины с использованием глубоких нейронных сетей.

Заключение. Основной проблемой предложенного метода является переобучение, которое может быть выражено в прогнозировании некоего среднего значения для разных изображений или предсказании одного и того же выхода для разных входов. Для решения данной проблемы могут быть использованы уже обученные сети или обучающие и вариационные выборки, содержащие 2D-изображения различных сцен.

Ключевые слова: компьютерное зрение; карты глубины; глубокое обучение; глубокие нейронные сети, цифровая обработка изображений; распознавание образов; нейронные сети; трехмерное очувствление.

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

Для цитирования: Применение глубоких нейронных сетей в задаче получения карты глубины из двумерного изображения / Д.И. Михальченко, А.Г. Ивин, О.Ю. Сивченко, Е.А. Аксаментов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 113-134. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-113-134>.

Статья поступила в редакцию 30.04.2019

Статья подписана в печать 20.05.2019

© Михальченко Д. И., Ивин А.Г., Сивченко О.Ю., Аксаментов Е.А., 2019

Application of Deep Neural Networks in the Problem of Obtaining Depth Maps from Two-Dimensional Images

Daniil I. Mikhilchenko¹ ✉, Arsenii G. Ivin¹, Oleg Yu. Sivchenko¹,
Egor A. Aksamentov¹

¹ St Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14 Line, St Petersburg, 199178, Russian Federation

✉ e-mail: tekatodsham@gmail.com

Abstract

Purpose of research is to study approaches to the depth map generation for deep neural networks testing and learning. The problem of obtaining information about the distance from the camera to the scenery object using a 2D image by means of deep neural networks without applying a stereocamera is considered.

Methods. Generation of 3D scenery for training and assessment of the neural network was carried out using the 3D-computer graphics application Blender. The standard deviation (RMS) was used to estimate the accuracy of learning. Machine learning was implemented using the Keras library and optimization was implemented using the AdaGrad approach.

Results. The architecture of a deep neural network which receives three sequences of 2D images from the 3D scenery video stream in the input and outputs the predicted depth map for the considered 3D scenery, is provided. The method for creating training data sets containing information about the depth of the map using Blender software is described. The problem of overtraining involving the fact that the created models work using specially generated data sets but still can not predict the correct depth map for random images is studied. The results of the testing actual methods for depth maps creation using deep neural networks are presented.

Conclusion. The main problem of the proposed method is overtraining which can be expressed in predicting a certain average value for different images or predicting the same output for different inputs. To solve this problem, we can use already trained networks or training and variation samples containing 2D images of different sceneries.

Keywords: computer vision; depth map; deep learning; deep neural networks; digital image processing; image recognition; neural networks; 3-D sensing.

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

For citation: Mikhilchenko D.I., Ivin A.G., Sivchenko O.Yu., Aksamentov E.A. Application of Deep Neural Networks in the Problem of Obtaining Depth Maps from Two-Dimensional Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 113-134 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-113-134>.

Received 30.04.2019

Accepted 20.05.2019

Введение

Карты глубины содержат информацию о местоположении окружающих объектов и могут использоваться для получения информации о форме этих

объектов. Они находят широкое применение в робототехнике и киберфизических системах [1–3], к примеру, для виртуального измерения расстояний [4],

создания различных 3D-представлений [5], оценки поз на изображениях [6], семантической сегментации при аэрофотосъемке [7] и т.д. Карты глубины часто используются для решения задач навигации робота [8 - 10] и определения цветовых характеристик объекта [11] и распознавания ракурсов на изображении [12].

Традиционным способом получения карт глубины является использование стереокамеры. В настоящее время прикладные методы построения карт глубины на основе стереоизображений активно разрабатываются на основе технологий, ранее опробованных на платформе Microsoft Kinect [13].

Кроме того, подобные задачи могут решаться, например, с применением метода зеркального разделения изображений [11]. Несмотря на преимущества данного подхода, для его реализации требуется специфическое аппаратное и программное обеспечение, что существенно сужает область его применения.

Кроме того, задачи стереозрения успешно решаются при помощи некоторых лазерных сенсоров, которые, однако, довольно дороги. В работе [14] исследовано построение стереоизображений при эксплуатации мобильного робота с применением фреймворка ROS и реализацией на языке Python.

Анализ работ, связанных с данной темой, показывает, что существует несколько основных подходов к извлечению карты глубины из одного 2D-изображения. Ряд инновационных решений такого рода связан с использова-

нием глубоких нейронных сетей (ГНС). Некоторые подобные исследования перечислены и кратко рассмотрены ниже. Общее состояние работ по оценке глубины одного изображения с применением нейронных сетей по состоянию на 2018 год представлено в работе [15]. Авторы использовали в своих предложениях параметры для сравнения качества работы имеющихся методов по оценке глубины 2-D изображения, основанных на разных нейронных сетях. Метод Eigen и Fergus [16] работает на основе сетей AlexNET и сети, разработанной в проекте «Группа визуальной геометрии» (VGG), Liu и др. [18] на глубоких сверточных нейронных сетях (DCNN), Laina и др. [17] на CoRR, Li и др. [19] на VGG и ResNET. Перечисленные нейронные сети представляют собой новейшие архитектуры ГНС, применяемые в анализе и оценке карт глубины.

В настоящее время ГНС используются в различных областях компьютерного зрения: детектирование объектов на изображениях различного масштаба [20], распознавание зашумленных изображений в резервуарных вычислительных сетях (RCN) [21], классификация изображений [22], сжатие [23], реконструкция [24, 25] и др.

Создание ГНС для получения карты глубины из 2D-изображения без использования методов стереозрения является актуальной задачей, поскольку в условиях постоянного нарастания объемов анализируемых данных требуются

более эффективные методы распознавания образов, в частности, их классификации и кластеризации. В настоящее время такие задачи все чаще решаются на практике при помощи ГНС и специализированных библиотек – в частности, OpenCV и Keras. Подобная тенденция четко прослеживается в актуальных работах [17 - 19], но другие решения в данной предметной области также сохраняются. Накопление все новых множеств данных, используемых для практической реализации алгоритмов компьютерного зрения, способствует распространению методов глубокого обучения при решении таких задач, как построение карт глубины. Целью данной работы является разработка способа создания моделей для генерации 3D-сцен, который позволил бы решить проблемы переобучения и отсутствия универсального набора данных для обучения ГНС. В следующем разделе представлен обзор современных методов построения карт глубины по одному двумерному изображению. В разделе 2 рассматриваются возможные пути решения сопутствующей задачи – самостоятельной подготовки подходящей выборки для обучения ГНС. Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена дефицитом и несовершенством подобных датасетов, имеющихся сегодня в наличии в свободном доступе. В разделе 3 обсуждаются возможные пути решения проблемы переобучения ГНС.

Материалы и методы решения задачи

Существует несколько работ, описывающих оценку карты глубины по

одному изображению. Например, метод, представленный в [16] и связанный с интеграцией локальной и глобальной информации со стереоизображений, хорошо работает на материале баз данных Нью-Йоркского университета [26]. Авторы предлагают использовать многоуровневую глубокую сеть для получения карты глубины из одного изображения. В этой работе сеть имеет два входа для одного и того же изображения. Один из входов используется для так называемого процесса переработки, который позволяет получить карту глубины с четкими границами объектов. Эта работа также предполагает использование масштабно-инвариантной ошибки для обучения. В описанной сети используются только стандартные сверточные и полносвязные слои.

В [27] для распознавания стереоизображений предлагается использовать сверточную нейронную сеть (CNN), уделяя особое внимание слиянию признаков, полученных при разных масштабах, для чего спроектирована улучшенная архитектура, состоящая из четырех модулей: энкодера, декодера, модуля слияния многомасштабных признаков и модуля переработки.

В [28] была предложена модель для оценки глубины, состоящая из двух частей: одна часть представляет собой сеть, предварительно подготовленную Оксфордской группой визуальной геометрии (VGG) [29], причем, эта сеть первоначально была обучена классифицировать объекты. Обучив модель, ав-

торы добавили два полносвязных слоя собственной разработки, чтобы проверить оценку глубины в режиме реального времени. Заявленное значение СКО составило 0,833.

При этом, в работе [30] авторы уделяют особое внимание неустранимым неоднозначностям, возникающим при восстановлении 3D-изображений из 2D-изображения. Такие неоднозначности иллюстрируются при сравнении методов обучения с учетом фокусного расстояния и без него, подтверждается критическое влияние фокусного расстояния на оценку глубины изображения. Предложен метод генерации набора данных с переменным фокусным расстоянием из набора данных с фиксированным фокусным расстоянием. Таким образом глубокая нейронная сеть фактически объединяет информацию из двух этих наборов данных, заполняя лакуны в сгенерированных изображениях и превосходит по определению глубины лучшие результаты, достигнутые на материале предобученной VGG.

Авторы [15] также делают акцент на использовании сверточных нейронных сетей и предлагают самостоятельно разработанную систему критериев оценки признаков, разработанную на материале множества данных RGB-D. В частности, авторы уделяют внимание сохранению граней, плоских поверхностей, согласованности глубин (depth consistency) и определению абсолютной точности расстояний.

В [31] представлен метод оценки глубины одного изображения. Проблема оценки глубины формулируется как задача дискретно-непрерывной оптимизации, где непрерывные переменные кодируют глубину суперпикселей во входном изображении, а дискретные переменные представляют собой отношения между соседними суперпикселями. Эта проблема определена как условное случайное поле. Авторы используют многочастичный алгоритм распространения доверия для вывода графической модели. В статье представлены результаты значения СКО 1,06-1,08. В более позднем исследовании достигнутое значение СКО этого метода составило 0,824 [17].

В [32] авторы также описывают оценку глубины с использованием методов глубокого обучения. Однако авторы оценивают глубину с помощью стереовхода, т.е. для создания карты глубины они используют стереоизображение. Кроме того, в статье показан хороший пример использования ГНС для создания алгоритма быстрой оценки глубины.

В [33] многомасштабная глубокая сверточная сеть используется для выполнения трех задач: прогнозирование глубины, оценка поверхности и семантическая маркировка. Предложенная модель изначально основана на архитектуре, представленной в [34], но с несколькими улучшениями: больше сверточных слоев, более высокое разрешение третьего слоя, прохождение многоканальных карт признаков вместо пере-

дачи выходных прогнозов из первого во второй слой. СКО предсказания глубины этой модели достигает 0,641.

В более старых работах, например в [35], авторы используют Марковскую сеть и обучение с учителем для создания карт глубины по одному изображению. Представленная модель не делает явных предположений о структуре изображения и способна захватывать гораздо более подробную трехмерную структуру. В результате авторы создают качественно правильные 3D-модели для 64,9% из 588 изображений.

Результаты и их обсуждение

Для создания валидной базы данных карты глубины требуются дорогие и не всегда доступные датчики, например лазерный дальномер. Кроме того, в открытом доступе можно найти только несколько существующих серий изображений с картами глубины. Для решения этой проблемы предлагается создание искусственных изображений с соответствующими картами глубины.

Созданный набор данных для обучения и проверки ГНС включает три набора изображений в градациях серого размером 160×120 . Входной слой принимает простые изображения в формате PNG, а выходной слой должен предоставлять карту глубины в формате OpenEXR [36]. Этот формат был выбран для изображений карты глубины, поскольку он позволяет хранить ненормализованные данные. Первые два набора данных для обучения были сгенериро-

ваны с применением 3D-компьютерной графики приложения Blender [37, 38]. После визуализации кадра сцены изображения и данные из канала глубины автоматически сохраняются в отдельных файлах.

Первый набор данных содержит только изображения лестницы в квадратной комнате с двумя источниками света. Второй набор был расширен другой сценой, включающей пять объектов разного масштаба, имеющих форму бутылочной крышки, и тремя объектами, имеющими сложную цилиндрическую форму с «ржавой» текстурой. На рисунке 1 показана вторая сцена, а также траектория камеры, фиксирующей сцену с разных позиций. Эти два обучающих набора содержат 500 изображений, сделанных с разных точек обзора. Валидационный набор данных был сформирован на тех же сценах, но с другой траекторией камеры.

Третий набор данных для обучения содержит 500 изображений реального мира. Существует два набора данных изображений и соответствующих им карт глубины в Make3D [35,39,40]. Эти наборы данных были сделаны с помощью лазерного сканера и камеры. Для хранения и обработки наборов данных в файлах HDF5 был написан инструмент на Python (рис. 2 и 3). В предлагаемых моделях ГНС используются сверточные и полносвязные слои. Инициализация Glorot [41] используется в сверточных слоях. Для инициализации в полностью подключенных слоях ис-

пользуется блок линейной ректификации (ReLU, rectified linear unit), как это было предложено в [42], а также Инициализация, предложенная в [43].

В качестве метрики для оценки точности обучения используется показатель СКО. Библиотека Keras [44] применяется для реализации машинного обучения, поскольку она проста в использовании, гибка и позволяет использовать различные фреймворки, к примеру, TensorFlow или Theano [45–47]. В нашей работе использовались машинные интерфейсы TensorFlow. Для оптимизации используется подход AdaGrad [48].

На рисунке 4 показан один из типов обученной модели. Этот рисунок демонстрирует принцип работы, но не конкретное количество слоев, поскольку

ку в эксперименте было разное количество сверточных и полносвязных слоев. На рисунке показано, что для изображений есть три входа. Эти изображения представляют собой короткий поток кадров, захваченных во время движения камеры.

Пока камера движется, объекты перемещаются с разной скоростью в зависимости от расстояния от камеры, что сравнимо с эффектом параллакса. Мы исходили из того, что сеть сможет научиться использовать этот эффект для создания карт глубины. После этого каждый из сверточных и плотных слоев обрабатывает каждое изображение, после чего они связываются и обрабатываются еще раз несколькими сверточными и полносвязными слоями.

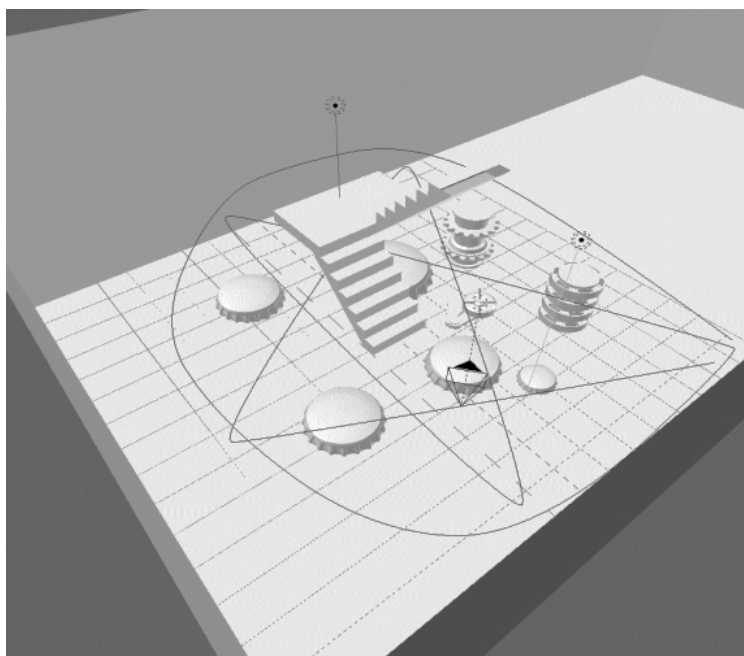


Рис. 1. Траектория камеры на второй моделируемой сцене

Fig. 1. Camera tracking in the second simulated scenery

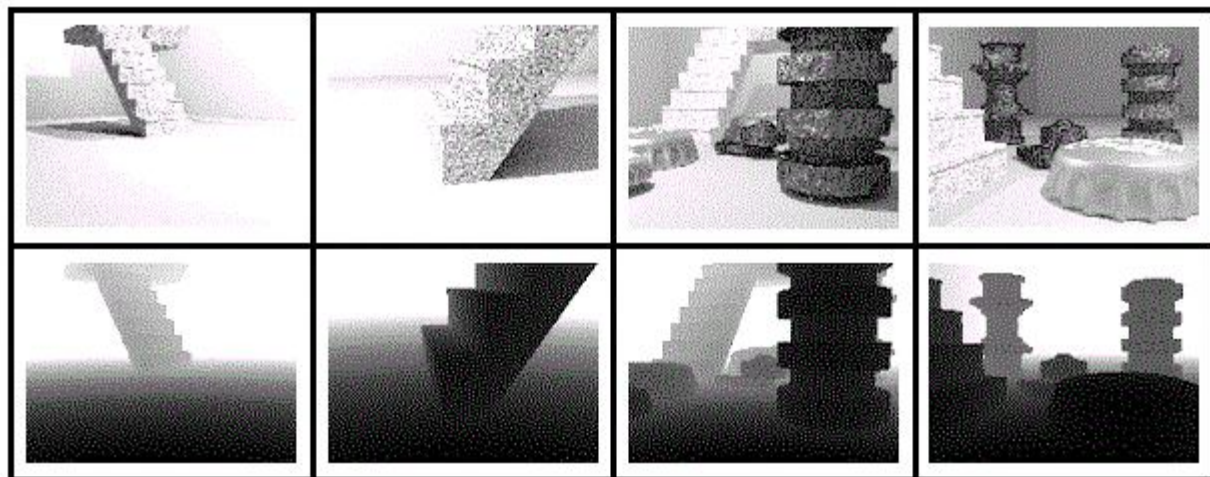


Рис. 2. Сгенерированный набор данных для обучения

Fig. 2. Generated training data set

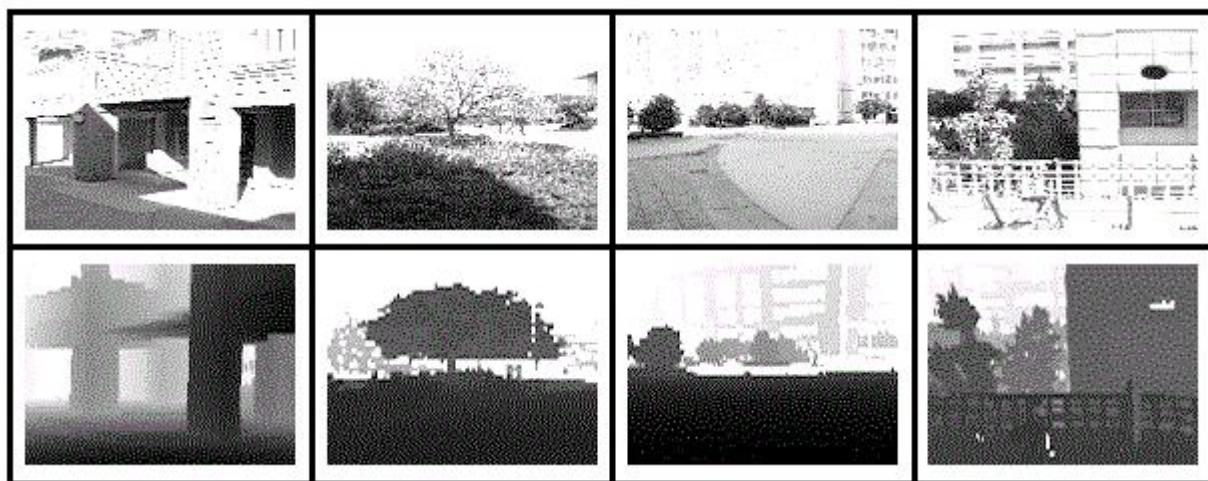


Рис. 3. Набор данных для обучения в формате Make3D

Fig. 3. Training data set in Make3D

В каждом коротком потоке кадров вывод должен давать карту глубины, соответствующую последнему изображению. Для уменьшения вероятности переобучения использовались прореживающие слои (dropout layers). Это известный метод решения проблемы переобучения [49]. Пример входных потоков кадров показан на рисунке 5, а. Соответствующие им карты глубины на

выходе представлены на рис 5, б. Как показано на рисунке 4, существует множество других слоев для изменения формы и сглаживания. Эти слои используются только для правильного подключения выходов и входов разных слоев. Графики моделей созданы с использованием встроенных инструментов Keras.

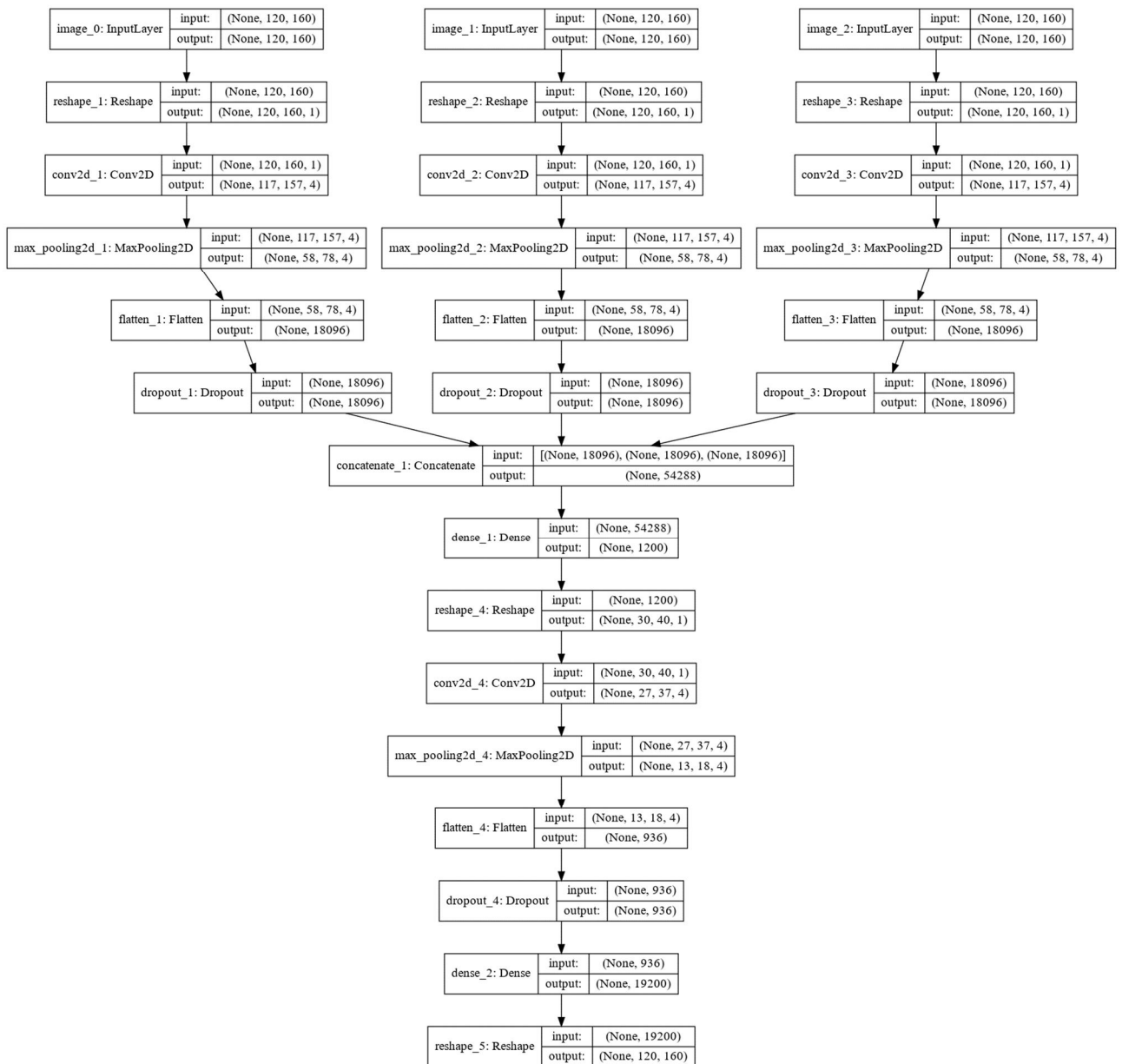


Рис. 4. Тип модели, принимающей три входа

Fig. 4. Three-input model type

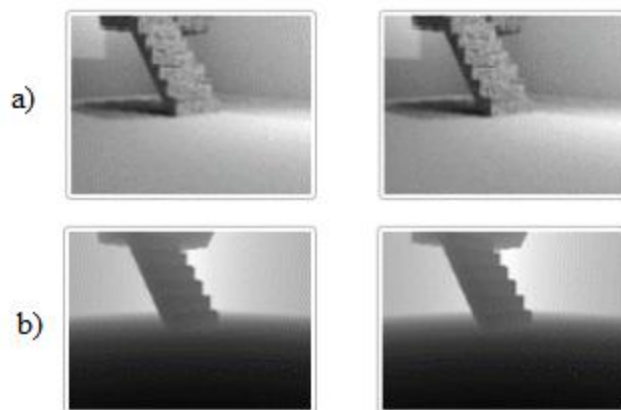


Рис. 5. Пример двух мини-поток в наборе данных

Fig. 5. Examples of two mini streams in a data set

Основная проблема предложенного подхода – переобучение. Типичная ситуация переобучения моделей представлена на рисунке 6. Пунктирной линией на графике обозначены потери значений, рассчитанные для валидационного набора данных. Из графика видно, что модель быстро начинает прогнозировать некое среднее значение и таким образом сохраняет его. Варьируя различные параметры модели, можно

добиться более низких значений потерь, однако это не решает проблему переобучения, поскольку ГНС все еще учится прогнозировать усредненное значение для разных изображений. Кроме того, существует еще одна проблема переобучения: модель всегда предсказывает один и тот же выход для каждого входа - обычно это первое изображение в наборе данных (рис. 7–8, а).

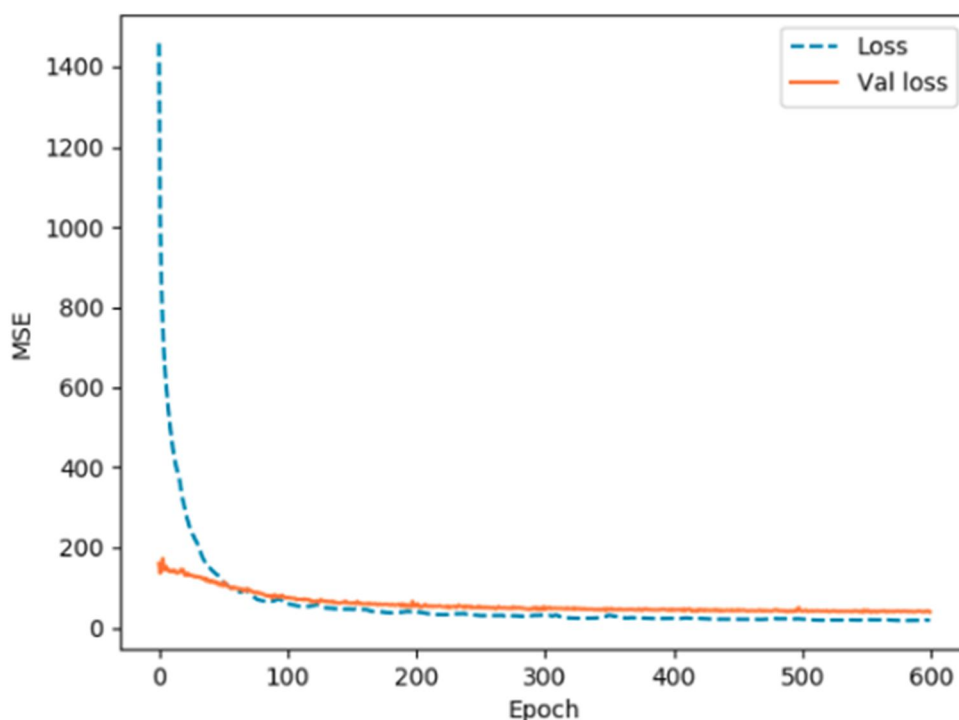


Рис. 6. Пример переобучения модели

Fig. 6. Example of model overtraining



Рис. 7. Результат эксперимента для модели с одним входом: (а) выход модели, (b)-(d) входные мини-потоки кадров, (е) ожидаемый результат

Fig. 7. The outcome of the experiment for the one input model: (a) model output, (b)-(d) input frame mini streams, (e) the expected result

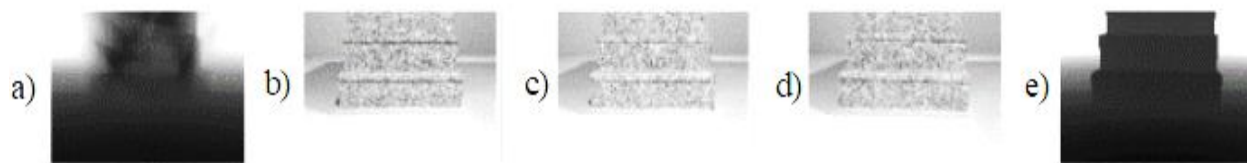


Рис. 8. Результат эксперимента для модели с тремя входами: (а) выход модели, (b)-(d) входные мини-потoki кадров, (е) ожидаемый результат

Fig. 8. The outcome of the experiment for three input model: (a) model output, (b)-(d) input frame mini streams, (e) the expected result

При размере пакета, равного 1, было достигнуто значение потерь 0,5 (рис. 9) и 33,77 на валидационной выборке (рис. 10). Пример работы модели на тестовой выборке показан на рисунке 3.

Несмотря на то, что визуализация такой карты легко распознаваема человеческим глазом, она не дает правильной оценки глубины (см. рис. 10).

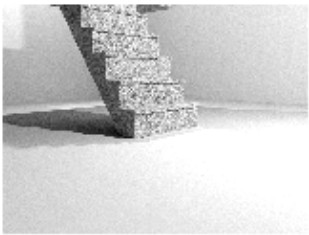
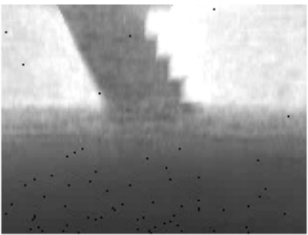
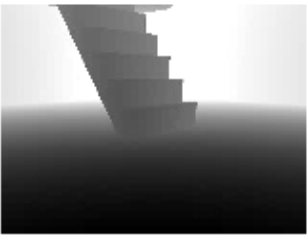
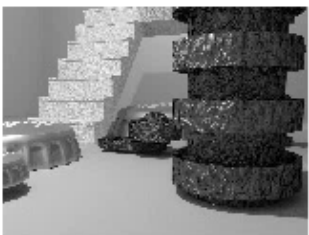
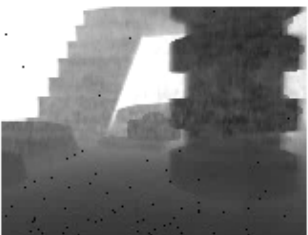
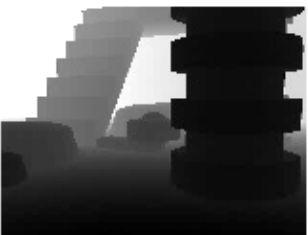
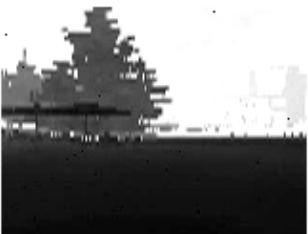
Изображение	Предсказание модели	Контрольные данные
		
		
		

Рис. 9. Результат работы модели на тестовой выборке

Fig. 9. Model work output for test sample

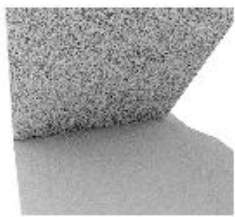
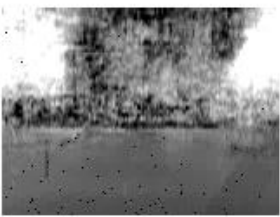
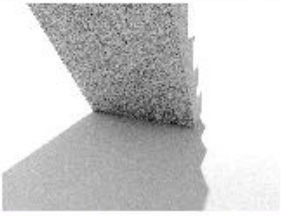
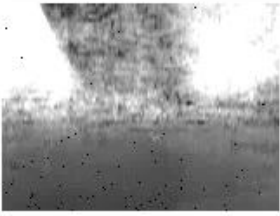
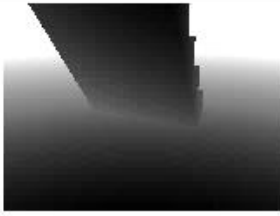
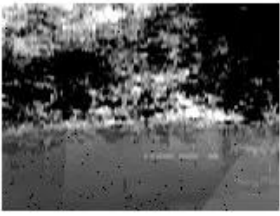
Изображение	Предсказание модели	Контрольные данные
		
		
		

Рис. 10. Результат работы модели на валидационной выборке

Fig. 10. Model work output for validation sample

Выводы

Основные проблемы построения карты глубины из одного изображения связаны с отсутствием универсального набора данных для обучения ГНС и с переобучением моделей. В данной работе был предложен способ создания моделей на основе специального программного обеспечения для генерации 3D-сцен, например, при помощи Blender: данный способ решает первую проблему, однако не устраняет проблему переобучения. В частности, из предсказанных изображений на рисунке 10 видно, что модель учится прогнозировать местоположение горизонта в одном и том же месте для каждого входа,

что, вероятно, связано с особенностями генерируемых наборов данных. При использовании модели с тремя входами переполнение может происходить из-за небольшого смещения объектов во входных мини-потоках, что дает практически одинаковые изображения. С другой стороны, использование обучающих и валидационных выборок, содержащих изображения различных сцен с различными объектами и видами, позволит создать наборы данных с более выраженным смещением между одними и теми же объектами на изображениях во входных мини-потоках для обучения модели с несколькими входами. Другое возможное решение – использовать уже обученную сеть, как это описано в [17].

Список литературы

1. Levonevskiy D., Vatamaniuk I., Saveliev A. Integration of corporate electronic services into a smart space using temporal logic of actions // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2017. 10459. P. 134-143. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_15.
2. Conceptual model of cyberphysical environment based on collaborative work of distributed means and mobile robots / A. Ronzhin, A. Saveliev, O. Basov, S. Solyonyj // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2016. Vol. 9812. P. 32-39. DOI: 10.1007/978-3-319-43955-6_5.
3. Scenarios of multimodal information navigation services for users in cyberphysical environment / I. Vatamaniuk, D. Levonevskiy, A. Saveliev, A. Denisov // International Conference on Speech and Computer. Springer, Cham. 2016. Vol. 9811. P. 588-595. DOI: 10.1007/978-3-319-43958-7_71.
4. Richards H.W. Method and apparatus for user interaction for virtual measurement using a depth camera system // U.S. Patent Application No 20170302908. 2017. T. 15/132. C. 822.
5. An efficient hole-filling method based on depth map in 3D view generation / H. Liang, X. Su, Y. Liu, H. Xu, Y. Wang, X. Chen // 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging/Spectroscopy and Signal Processing Technology. 2018. Vol. 10620, DOI: 10.1117/12.2293301.
6. Girshick R. Efficient regression of general-activity human poses from depth images //2011 International Conference on Computer Vision. IEEE, 2011. P. 415-422.
7. Sun Y. Developing a multi-filter convolutional neural network for semantic segmentation using high-resolution aerial imagery and LiDAR data //ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2018. Vol. 143. P. 3-14.
8. Watts K.W. , Konolige K. Ground plane detection to verify depth sensor status for robot navigation // US Patent No. 9886035. 2018.
9. Tee Kit Tsun M., Lau B.T., Jo H. Siswoyo An improved indoor robot human-following navigation model using depth camera // Active IR marker and proximity sensors fusion, Robotics. 2018. Vol. 7. № 1. P. 4. DOI: 0.3390/robotics7010004.
10. Горобцов А.С. Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движения шагающих роботов // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, №1. С. 85-122. DOI: 10.15622/sp.18.1.85-122.

11. Алтухов В.Г. Вычисление расстояния до объекта на основе карты глубин полученной методом зеркального разделения изображений // Автоматика и программная инженерия. 2017. Т. 1. С. 65-69.
12. Ерофеев М.В. Многослойное решение проблемы полупрозрачных границ при построении стереоскопических изображений // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4. № 8.
13. Lin K.Y., Hang H.M. Depth Map Enhancement on RGB-D Video Captured by Kinect V2 // 2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). IEEE, 2018. С. 1530-1535.
14. Ульянов С.В. Разработка системы стереозрения для мобильного робота // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 3.
15. Koch T. Evaluation of CNN-based single-image depth estimation methods // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018. С. 0-0.
16. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multiscale deep network // Advances in Neural Information Processing Systems. 2014. С. 2366-2374. arXiv: 1406.2283v1.
17. Liu F., Shen C., Lin G. Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single image // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015. С. 5162-5170. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7299152.
18. Laina I., Rupprecht C., Belagiannis V., Tombari F., Navab N. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks. CoRR, abs/1606.00373. 2016. DOI: 10.1109/3dv.2016.32. arXiv: 1606.00373.
19. Li J., Klein R., Yao A. A two-streamed network for estimating fine-scaled depth maps from single rgb images. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017. p. 3372–3380.
20. Применение нечётких нейронных сетей для определения типа кристаллических решёток, наблюдаемых на наномасштабных изображениях / О.П. Солдатова, И.А. Лёзин, И.В. Лёзина, А.В. Куприянов, Д.В. Кирш // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 5. С. 787-795. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-787-794.
21. On the application of reservoir computing networks for noisy image recognition / A. Jalalvand, K. Demuynck, W.D. Neve, J.-P. Martensa // Neurocomputing. 2018. Т. 277. С. 237-248. DOI: 10.1016/j.neucom.2016.11.100.
22. Dutta S. Classification of diabetic retinopathy images by using deep learning models / S. Dutta, B. CS Manideep, S.M. Basha, R.D. Caytiles, N.Ch.S.N. Iyengar // International

Journal of Grid and Distributed Computing. 2018. Т. 11. № 1. С. 89-106. DOI: 10.14257/ijgdc.2018.11.1.09.

23. Сирота А.А., Дрюченко М.А. Обобщённые алгоритмы сжатия изображений на фрагментах произвольной формы и их реализация с использованием искусственных нейронных сетей // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 5. С. 751-761. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-751-761.

24. Реконструкция изображений в дифракционно-оптических системах на основе сверточных нейронных сетей и обратной свертки / А.В. Никоноров, М.В. Петров, С.А. Бибииков, В.В. Кутикова, А.А. Морозов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 6. С. 875-887. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-875-887.

25. Олейник А.Л. Алгоритмы взаимной реконструкции изображений лиц на основе методов проекции в собственные подпространства // Труды СПИИРАН. 2018. Т. 2, №57. С. 45-74. DOI: 10.15622/sp.57.3

26. Silberman N., Fergus R. Indoor scene segmentation using a structured light sensor // ICCV Workshop on 3D Representation and Recognition. 2011. P. 601-608.

27. Hu J. et al. Revisiting single image depth estimation: toward higher resolution maps with accurate object boundaries //2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, 2019. P. 1043-1051.

28. Zhu J. Ma R. (2016), Real-time depth estimation from 2D images. Available at: http://cs231n.stanford.edu/reports/2016/pdfs/407_Report.pdf (accessed May 1, 2018).

29. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015. P. 1-14. arXiv: 1409.1556.

30. He L., Wang G., Hu Z. Learning depth from single images with deep neural network embedding focal length // IEEE Transactions on Image Processing. 2018. Vol. 27. № 9. P. 4676-4689.

31. Liu M., Salzmann M., He X. Discrete-continuous depth estimation from a single image // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014. С. 716-723. DOI: 10.1109 / CVPR.2014.97.

32. Luo W., Schwing A.G., Urtasun R. Efficient deep learning for stereo matching // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 5695-5703. DOI: 10.1109/CVPR.2016.614.

33. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture // The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. P. 2650-2658. DOI: 10.1109 / ICCV.2015.304.

34. Vision meets robotics: the KITTI dataset / A. Geiger, A. Lenz, C. Stiller, R. Urtasun // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32. № 11. P. 1231-1237. DOI: 10.1177/0278364913491297.
35. Saxena A., Sun M., Ng A.Y. Make3d: learning 3D scene structure from a single still image // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009. Vol. 31. № 5. P. 824-840. DOI: 10.1109 / TPAMI.2008.132.
36. Bogart R., Kainz F., Hess D. OpenEXR image file format / // ACM SIGGRAPH. 2003. Sketches & Applications.
37. Kent B.R. 3D Scientific Visualization with Blender®, Morgan & Claypool, San Rafael, 2015.
38. Valenza E. Blender 2.6 Cycles: Materials and Textures Cookbook – Third Edition. Packt Publishing Ltd. Birmingham. Mumbai. 2013. 280 с.
39. Saxena A. Learning depth from single monocular images / A. Saxena, S.H. Chung, Y. Ng. Andrew // Neural Information Processing Systems (NIPS). 2005. P. 1161-1168. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2505283.
40. Saxena A., Chung S.H., Andrew Y. Ng. 3D depth reconstruction from a single still image // International Journal of Computer Vision. 2008. Vol. 76. № 1. P. 53-69. DOI: 10.1109 / TPAMI.2008.132.
41. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks // Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. 2010. Vol. 9. P. 249-256.
42. Heaton J. Artificial Intelligence For Humans: Deep Learning and Neural Networks / J. Heaton Heaton Research. Inc., St Louis, MO, 2015. Vol. 3. 375 p.
43. Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on imagenet classification / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 1026-1034. DOI: 10.1109 / ICCV.2015.123
44. Keras: The Python Deep Learning library. Available at: <https://keras.io/> (accessed 31.08.2018)
45. Backends – TensorFlow or Theano. Available at: <https://www.tensorflow.org/> (accessed 31.08.2018)
46. TensorFlow: a system for large-scale machine learning / M. Abadi, P. Barham, J. Chen, Z. Chen, A. Davis, J. Dean, M. Devin, S. Ghemawat, G. Irving, M. Isard, M. Kudlur, J. Levenberg, R. Monga, S. Moore, D.G. Murray, B. Steiner, P. Tucker, V. Vasudevan, P. Warden, M. Wicke, Y. Yu, X. Zheng, G. Brain // the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16). Nov. 2-4. 2016. P. 265-283.

47. Tensorflow: large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems / M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo, Z. Chen, C. Citro, G.S. Corrado, A. Davis, J. Dean, M. Devin, S. Ghemawat, I. Goodfellow, A. Harp, G. Irving, M. Isard, Y. Jia, R. Jozefowicz, L. Kaiser, M. Kudlur, J. Levenberg, D. Mane, R. Monga, S. Moore, D. Murray, C. Olah, M. Schuster, J. Shlens, B. Steiner, I. Sutskever, K. Talwar, P. Tucker, V. Vanhoucke, V. Vasudevan, F. Viegas, O. Vinyals, P. Warden, M. Wattenberg, M. Wicke, Y. Yu, X. Zheng // (2016b). Available at: <https://arxiv.org/pdf/1603.04467.pdf> (accessed May 1, 2018).
48. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization // *Journal of Machine Learning Research*. July. 2011. Vol. 12. P. 2121-2159.
49. Reduction of overfitting in diabetes prediction using deep learning neural network / A. Ashiquzzaman, A.K. Tushar, Md. R. Islam, D. Shon, K. Im, J.-H. Park, D.-S. Lim, J. Kim // *2017 IT Convergence and Security*. Springer, Singapore. 2018. Vol. 449. P. 35-43. DOI: 10.1007/978-981-10-6451-7_5.

Reference

1. Levonevskiy D., Vatamaniuk I., Saveliev A. Integration of corporate electronic services into a smart space using temporal logic of actions. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, Springer, Cham 2017; 10459, pp. 134-143. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_15.
2. Ronzhin A., Saveliev A., Basov O., Solyonyj S. Conceptual model of cyberphysical environment based on collaborative work of distributed means and mobile robots. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham 2016; 9812, pp. 32-39. DOI: 10.1007/978-3-319-43955-6_5.
3. Vatamaniuk I., Levonevskiy D., Saveliev A., Denisov A. Scenarios of multimodal information navigation services for users in cyberphysical environment. *International Conference on Speech and Computer*. Springer, Cham 2016; 9811, pp. 588-595. DOI: 10.1007/978-3-319-43958-7_71.
4. Richards HW. Method and apparatus for user interaction for virtual measurement using a depth camera system. U.S. Patent Application no. 20170302908, 2017, no. 15(132), p. 822.
5. Liang H., Su X., Liu Y., Xu H., Wang Y., Chen X. An efficient hole-filling method based on depth map in 3D view generation. *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging/Spectroscopy and Signal Processing Technology*, 2018; 10620. DOI: 10.1117/12.2293301.

6. Girshick R., Shotton J., Kohli P., Criminisi A., Fitzgibbon A. Efficient regression of general-activity human poses from depth images. 2011 International Conference on Computer Vision, 2011, pp. 415-422.
7. Sun Y., Zhang X., Xin Q., Huang, J. Developing a multi-filter convolutional neural network for semantic segmentation using high-resolution aerial imagery and LiDAR data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2018, vol. 143, pp. 3-14.
8. Watts K.W., Konolige K., Konolige K. Ground plane detection to verify depth sensor status for robot. US Patent no. 9886035, 2018.
9. Tee Kit Tsun M., Lau B., Siswoyo Jo H. An improved indoor robot human-following navigation model using depth camera, active IR marker and proximity sensors fusion. *Robotics*, 2018, no. 7(1), 4 p. DOI: 0.3390/robotics7010004.
10. Gorobtsov A.S., Andreev A.E., Markov A.E., Skorikov A.V., Tarasov P.S. Osobennosti resheniya uravnenii metoda obratnoi zadachi dlya sinteza ustoichivogo upravlyaemogo dvizheniya shagayushchikh robotov [Features of solving the inverse dynamic method equations for the synthesis of stable walking robots controlled motion]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2019, no. 18, pp. 85-122. DOI: 10.15622/sp.18.1.85-122 (In Russ.).
11. Altukhov V.G., Kolker A.B. Vychislenie rasstoyaniya do ob"ekta na osnove karty glubin poluchennoi metodom zerkal'nogo razdeleniya izobrazhenii [Calculation of the distance to the object based on the depth map obtained by the method of mirror image separation]. *Avtomatika i programnaya inzheneriya = Automation and Software Engineering*, 2017, no. 1, pp. 65-69 (In Russ.).
12. Erofeev M., Vatolin D. Mnogosloinoe reshenie problemy poluprozrachnykh granits pri postroenii stereoskopicheskikh izobrazhenii [A multi-layered solution to the problem of translucent boundaries when building stereoscopic images]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2016, no.4(8) (In Russ.).
13. Lin K.Y., Hang H.M. Depth Map Enhancement on RGB-D Video Captured by Kinect V2. 2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2018, pp. 1530-1535.
14. Ulyanov S.V., Reshetnikov A.G., Koshelev K.V. Razrabotka sistemy stereozreniya dlya mobil'nogo robota [Development of a stereo vision system for a mobile robot]. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2017; no. 30(3) (In Russ.).
15. Koch T. Evaluation of CNN-based single-image depth estimation methods. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018.
16. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multiscale deep network. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 2366-2374. arXiv: 1406.2283v1.

17. Liu F., Shen C., Lin G., Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015, pp. 5162-5170. DOI: 10.1109/ CVPR.2015.7299152.
18. Laina I., Rupprecht C., Belagiannis V., Tombari F., Navab N. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks. CoRR, abs/1606.00373. 2016. DOI: 10.1109/3dv.2016.32. arXiv: 1606.00373.
19. Li J., Klein R., Yao A. A two-streamed network for estimating fine-scaled depth maps from single rgb images. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017, pp. 3372–3380.
20. Soldatova O.P., Lyozin I.A., Lyozina I.V., Kupriyanov A.V., Kirsh D.V. Primenenie nechetkikh neironnykh setei dlya opredeleniya tipa kristalliche-skikh reshetok, nablyudayemykh na nanomasshtabnykh izobrazheniyakh [Application of fuzzy neural networks for defining crystal lattice types in nanoscale images]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2015; no. 39(5): 787-795. (In Russ.). DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-787-794.
21. Jalalvand A., Demuynck K., Neve W.D., Martensa J.-P. On the application of reservoir computing networks for noisy image recognition. *Neurocomputing*. 2018; 277: 237-248. DOI: 10.1016/j.neucom.2016.11.100.
22. Dutta S., Manideep B.CS., Basha S.M., Caytiles R.D., Iyengar N.Ch.S.N. Classification of diabetic retinopathy images by using deep learning models. *International Journal of Grid and Distributed Computing*. 2018; no. 11(1), pp. 89-106. DOI: 10.14257/ijgdc.2018.11.1.09.
23. Sirota A.A., Dryuchenko M.A. Obobshchennyye algoritmy szhatiya izobrazhenii na fragmentakh proizvol'noi formy i ikh realizatsiya s ispol'zovaniem iskusstvennykh neironnykh setei [Generalized image compression algorithms for arbitrarily-shaped fragments and their implementation using artificial neural networks]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2015; 39(5): 751-761. (In Russ.). DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-751-761.
24. Nikonorov A.V., Petrov M.V., Bibikov S.A., Kutikova V.V., Morozov A.A., Kazanskij N.L. Rekonstruktsiya izobrazhenii v difraktsionno-opticheskikh sistemakh na osnove svertochnykh neironnykh setei i obratnoi svertki [Image restoration in diffractive optical systems using deep learning and deconvolution]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2017; no. 41(6), pp. 875-887. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-875-887.
25. Oleinik A.L., Kukharev, G.A. Algoritmy vzaimnoi rekonstruktsii izobrazhenii lits na osnove metodov proektsii v sobstvennyye podprostranst [Algorithms for Face Image Mutual Reconstruction by Means of Two-Dimensional Projection Methods]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2018; 2(57): 45-74. (In Russ.). DOI: 10.15622/sp.57.3.

26. Silberman N, Fergus R. Indoor scene segmentation using a structured light sensor. Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on; 2011, pp. 601-608.
27. Hu J., Ozay M., Zhang Y., Okatani T. Revisiting single image depth estimation: toward higher resolution maps with accurate object boundaries. 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 2019, pp. 1043-1051.
28. Zhu J. Ma R. (2016), Real-time depth estimation from 2D images. Available at: http://cs231n.stanford.edu/reports/2016/pdfs/407_Report.pdf (accessed May 1, 2018).
29. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR), 2015, pp. 1-14. arXiv: 1409.1556.
30. He L., Wang G., Hu Z. Learning depth from single images with deep neural network embedding focal length. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, no. 27(9), pp. 4676-4689.
31. Liu M., Salzmann M., He X. Discrete-continuous depth estimation from a single image. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014, pp. 716-723. DOI: 10.1109 / CVPR.2014.97.
32. Luo W., Schwing A.G., Urtasun R. Efficient deep learning for stereo matching. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 5695-5703. DOI: 10.1109/CVPR.2016.614.
33. Eigen D., Fergus R. Predicting depth, surface normals and semantic labels with a common multi-scale convolutional architecture. The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015, pp. 2650-2658. DOI: 10.1109 / ICCV.2015.304.
34. Geiger A., Lenz A., Stiller C., Urtasun R. Vision meets robotics: the KITTI dataset. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, vol. 32, no. 11, pp. 1231-1237. DOI: 10.1177/0278364913491297.
35. Saxena A., Sun M., Ng A. Y. Make3d: learning 3D scene structure from a single still image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, no. 31(5), pp. 824-840. DOI: 10.1109 / TPAMI.2008.132.
36. Bogart R., Kainz F., Hess D. OpenEXR image file format. ACM SIGGRAPH 2003, Sketches & Applications, 2003.
37. Kent B.R. 3D Scientific Visualization with Blender, Morgan & Claypool, San Rafael, 2015.
38. Valenza E. Blender 2.6 Cycles: Materials and Textures Cookbook – Third Edition. Packt Publishing Ltd. Birmingham, Mumbai, 2013, 280 p.

39. Saxena A., Chung S.H., Andrew Y.Ng. Learning depth from single monocular images. *Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2005, pp. 1161-1168. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2505283.
40. Saxena A., Chung S.H., Andrew Y. Ng. 3D depth reconstruction from a single still image. *International Journal of Computer Vision*, 2008, no. 76(1), pp. 53-69. DOI: 10.1109 / TPAMI.2008.132.
41. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, 2010, no. 9, pp. 249-256.
42. Heaton J. Artificial Intelligence For Humans: Deep Learning and Neural Networks, Heaton Research. Inc., St Louis, MO 2015; no. 3.
43. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on imagenet. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015; 1026-1034. DOI: 10.1109 / ICCV.2015, 123 p.
44. Keras library. Available at: <https://keras.io/> (acceessed 31.08.2018).
45. Backends—TensorFlow or Theano. Available at: www.tensorflow.org/ (acceessed 31.08.2018).
46. Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S., Irving G., Isard M., Kudlur M., Levenberg J., Monga R., Moore S., Murray D.G., Steiner B., Tucker P., Vasudevan V., Warden P., Wicke M., Yu Y., Zheng X., Brain G. TensorFlow: a system for large-scale machine learning. The 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16), Nov. 2-4, 2016; pp. 265-283.
47. Abadi M., Agarwal A., Barham P., Brevdo E., Chen Z., Citro C., Corrado G.S., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S., Goodfellow I., Harp A., Irving G., Isard M., Jia Y., Jozefowicz R., Kaiser L., Kudlur M., Levenberg J., Mane D., Monga R., Moore S., Murray D., Olah C., Schuster M., Shlens J., Steiner B., Sutskever I., Talwar K., Tucker P., Vanhoucke V., Vasudevan V., Viegas F., Vinyals O., Warden P., Wattenberg M., Wicke M., Yu Y., Zheng X. Tensorflow: large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. (2016b). Available at: <https://arxiv.org/pdf/1603.04467.pdf> (accessed May 1, 2018).
48. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization. *Journal of Machine Learning Research*. July 2011; 12: pp. 2121-2159.
49. Ashiquzzaman A., Tushar A.K., Islam MdR., Shon D., Im K., Park J.-H, Lim D.-S, Kim J, Reduction of overfitting in diabetes prediction using deep learning neural network. 2017 IT Convergence and Security, Springer, Singapore 2018; 449, pp. 35-43. DOI: 10.1007/978-981-10-6451-7_5.

Информация об авторах / Information about the Authors

Михальченко Даниил Игоревич, аспирант лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: tekatodsham@gmail.com

Daniil I. Mihalchenko, Post-Graduate Student, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation e-mail: tekatodsham@gmail.com

Ивин Арсений Григорьевич, аспирант лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, разработчик программного обеспечения, ООО Яндекс.Технологии, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: arssivka@yandex.ru

Arsenii G. Ivin, Post-Graduate Student, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Software Developer, Yandex.Technology LLC. St. Petersburg, Russian Federation e-mail: arssivka@yandex.ru

Сивченко Олег Юрьевич, программист лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [E-mail: adrelan@gmail.com](mailto:adrelan@gmail.com)

Oleg Y. Sivchenko, Programmer, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg, Russian Federation e-mail: adrelan@gmail.com

Аксаментов Егор Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Egor.aksamentov.96@mail.ru

Egor A. Aksamentov, Junior Research Fellow, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation e-mail: Egor.aksamentov.96@mail.ru

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-135-147>

Метод коррекции дисторсии в задачах обработки изображений этикеток

Д.А. Волков ¹, В.С. Панищев ² ✉, М.И. Труфанов ²

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Ленинский проспект, 65, г. Москва, 119991, Российская Федерация

² Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, ул. Маршала Бирюзова, 7а, г. Одинцово, Московская обл., Российская Федерация

✉ e-mail: gskunk@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В работе объектом исследования являются методы и алгоритмы автоматического получения и улучшения качества цифровых изображений в контроллерах для систем этикетирования и систем обработки и распознавания изображений. Цель работы – разработка новых методов улучшения качества и обработки изображений для использования в оптико-электронных устройствах и системах технического зрения. Отмечена актуальность научно-технической задачи по расширению функциональных возможностей и повышению качества функционирования вычислительных устройств в системах управления и контроля качества этикетирования объектов, в частности, отмечена необходимость выделения изображения этикетки с целью определения нарушения качества ее нанесения. В качестве основной корректируемой особенности получаемых изображений выбрана дисторсия.

Методы. Рассмотрены основные подходы, используемые при определении и коррекции дисторсии, выявлены их недостатки, проведен анализ основных методов, описанных в литературе. В работе использовались аппарат аналитической геометрии, теория распознавания образов, методы обработки и анализа растровых изображений.

Результаты. Разработан метод обработки изображений для улучшения их качества, программное обеспечение для обнаружения и обработки изображений этикеток и документов. Предложен вариант определения радиальной дисторсии при смещении наблюдения в различных направлениях. Выполнено моделирование разработанного метода с помощью специально созданного программного обеспечения. Проведены экспериментальные исследования созданного программного обеспечения. Приведены их результаты и отмечены достоинства и недостатки.

Заключение. Разработанный метод может использоваться в устройствах получения и обработки изображений, функционирующих в автоматическом режиме и применяемых в системах технического зрения и контроля качества этикетирования.

Ключевые слова: обработка изображений; обнаружение этикетки; коррекция дисторсии.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы № 0071-2019-0001 Развитие теории и методов прикладной математики, нейросетевых технологий и систем управления процессами в задачах CAD-систем, анализа визуальных данных, защиты информации и прогнозирования.

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

Для цитирования: Волков Д.А., Панищев В.С., Труфанов М.И. Метод коррекции дисторсии в задачах обработки изображений этикеток // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 135-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-135-147>.

Статья поступила в редакцию 02.04.2019

Статья подписана в печать 14.05.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-135-147>

A Method for Distortion Correction in Label Images Processing

Denis A. Volkov ¹, Vladimir S. Panishchev ² ✉, Maksim I. Truphanov ²

¹ National University of Oil and Gas "Gubkin University", 65, Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation

² Design information technologies Center of Russian academy of sciences, 7a, Marhsala Biryuzova str., Odintsovo, Moscow region, Russian Federation

✉ e-mail: gskunk@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Methods and algorithms for automatic acquisition and improvement of digital image quality in controllers for labeling systems and image processing and recognition systems are the objects of the article. The purpose of the study is to develop new methods to improve quality and image processing for optoelectronic devices and vision systems. The topicality of the scientific and technical task to expand the functionality and improve the quality of computing devices in control systems and quality control of objects labeling is mentioned; in particular, the need to extract the image of the label in order to determine defects of the quality of labeling is highlighted. Distortion was chosen as the main adjustable feature of the obtained images.

Methods. The main approaches used in the determination and correction of distortion are considered; their shortcomings are revealed; the analysis of the main methods described in the literature is carried out. The paper used the framework of analytical geometry, pattern recognition theory, methods for processing and analysis of bitmap images.

Results. A method for image processing to improve image quality, software for detecting and processing images of labels and documents were developed. A variant of determining the radial distortion in case of the shift of the observation in different directions is proposed. The modeling of the developed method by means of the specially created software is performed. The experimental studies of the developed software were carried out. Their results are provided, and advantages and disadvantages are highlighted.

Conclusion. The developed method can be used in image acquisition and processing devices operating in automatic mode and applied in vision and labeling quality control systems.

Keywords: image processing; label detection; distortion correction.

Acknowledgements: The work was done under the theme n 0071-2019-0001 Development of theory and methods of applied mathematics, neural network technology and systems management of processes in problems of CAD systems, analysis of visual data, protection of information and forecasting.

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

For citation: Volkov D.A., Panishchev V.S., Truphanov M.I. A Method for Distortion Correction in Label Images Processing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 135-147 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-135-147>.

Received 02.04.2019

Accepted 14.05.2019

Введение

В организации обслуживания технологического процесса большую роль играют вычислительные устройства для локальных систем управления технологическим оборудованием и процессами. Примером таких систем являются устройства-контроллеры для систем этикетирования (нанесения этикеток, марок, ценников и т.п.) на подвижный объект. Такие контроллеры позволяют решать следующие задачи: обработка информации от различного рода датчиков (температуры, движения, объекта и т.п.), расчет необходимых параметров технологического процесса, ввод настроечных параметров процесса этикетирования, а также формирование управляющих воздействий для исполнительных механизмов [1-3]. При этом актуальной научно-технической задачей является расширение функциональных возможностей и повышение качества функционирования вычислительных устройств в системах управления и контроля качества этикетирования объектов. В частности существует необходимость выделения изображения этикетки с целью определения нарушения качества ее нанесения.

Особенностью получаемых изображений является наличие в них искажений, самым распространенным из которых является дисторсия.

Для определения основных подходов, используемых при определении и коррекции дисторсии, и выявления их

особенностей проведен анализ описанных в статьях и патентных документах существующих моделей, устройств и способов калибровки, определения и коррекции дисторсии.

Материалы и методы решения задачи

Наиболее широко известной на сегодняшний день является полиномиальная модель [4], описывающая дисторсию. Ряд проведенных экспериментов [5, 6] показал, что использование только коэффициента радиальной дисторсии первого порядка k_1 достаточно, так как обеспечивает точность определения дисторсии до 0.1 пикселя на изображении при использовании стандартных оптических систем [7].

Неискаженные координаты точек изображения могут быть получены по формуле

$$\begin{aligned} x_u &= x_d(1 + k_1 r_d^2), \\ y_u &= y_d(1 + k_1 r_d^2), \end{aligned} \quad (1)$$

где $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ - радиус дисторсии.

Инверсная модель, описывающая дисторсию, выглядит следующим образом:

$$r_u = r_d(1 + k_1 r_d^2), \quad (2)$$

где $r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$ - это неискаженный радиус, а r_d - искаженный радиус.

Это полином третьей степени, где значение r_d можно получить, вычислив корни уравнения $r_d^3 + cr_d + d = 0$, с

$c = \frac{1}{k_1}$ и $d = -cr_u$, которое решается с

использованием метода Кардана. Этот метод является основным для решения полиномов третьей степени. Уравнение имеет один или три реальных решения, в зависимости от знака дискриминанта:

$$\Delta = Q^3 + R^2,$$

где $Q = \frac{c}{3}$, а $R = -\frac{d}{2}$.

Если $\Delta > 0$, то есть только один реальный корень:

$$r_d = \sqrt[3]{R + \sqrt{\Delta}} + \frac{Q}{\sqrt[3]{R + \sqrt{\Delta}}}, \quad (3)$$

если $\Delta < 0$, то в этом случае три решения, но только одно правильное, т.к. когда r_u постоянно, r_d может быть непрерывным функционалом k_l . Непрерывность в $k_l = 0$ дает решение:

$$r_d = -S \cos T + S\sqrt{3} \sin T, \quad (4)$$

где $S = \sqrt[3]{\sqrt{R - \Delta}}$ и $T = \frac{1}{3} \arctan \frac{\sqrt{-\Delta}}{R}$.

Объединяя (1) и (2), получают:

$$x_d = x_u \frac{r_d}{r_u}, \quad (5)$$

$$y_d = y_u \frac{r_d}{r_u}.$$

С линзами с большой дисторсией необходимо использовать слагаемые большего порядка в выражении (1) в модели дисторсии [8]. В этом случае преобразование из неискаженных в искаженные координаты имеет решение в аналитическом виде, и может быть использован алгоритм решения, например, метод Ньютона.

Задача калибровки дисторсии, по мнению Девернея и Фаугераса [9], состоит в нахождении такого преобразования, которое отображает реальную

картинную плоскость на изображение для перспективной камеры. То есть для калибровки дисторсии используют некоторые объекты в трехмерном пространстве, которые должны отображаться на плоскость прямыми линиями, но вследствие влияния дисторсии, линии становятся кривыми, а задача стоит в нахождении этих линий, определении степени их искажения и последующей коррекции всего изображения.

Другой распространенный метод для определения дисторсии – это аппроксимация ее влияния методом наименьших квадратов. Так аппроксимируется каждый контур, который считается проекцией сектора пространственного объекта, содержащего линию [10], и принимается за ошибку дисторсии сумма квадратов расстояний от точки до линии (т.е. χ^2 наименьшей квадратичной аппроксимации).

Это отражают в следующем выражении для каждого контура, задаваемого n точками с координатами (x_j, y_j) :

$$\chi^2 = a \sin^2 \varphi - 2|b| |\sin \varphi| \cos \varphi + c \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

$$a = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2, \quad (7)$$

$$b = \sum_{j=1}^n x_j y_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n y_j, \quad (8)$$

$$c = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n y_j \right)^2, \quad (9)$$

$$\alpha = a - b; \beta = \frac{\alpha}{2\sqrt{\alpha^2 + 4b^2}}, \quad (10)$$

$$|\sin \varphi| = \sqrt{\frac{1}{2} - \beta}; \cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{2} + \beta}, \quad (11)$$

где φ – угол между линией и оптической осью, $\sin \varphi$ должен быть того же знака, что и b , φ может быть рассчитан, как

$\varphi = \frac{1}{2} \arctan 2(b, a - c)$, но только $\sin \varphi$ и $\cos \varphi$ используются для расчета χ^2 .

Традиционным подходом к определению дисторсии [11] является использование специально созданного эталонного объекта, расположенного в заданной плоскости рабочей сцены, по изображению которого производится определение искажений [12,13]. Однако для реализации адаптивной калибровки необходима математическая модель калибровки дисторсии, позволяющая определять дисторсию в автоматическом режиме без использования специально созданного калибровочного объекта.

Искажения, вызванные радиальной дисторсией линз, определяются [13] по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= x (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots + k_n r^{2n}), \\ \Delta y_r &= y (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots + k_n r^{2n}), \end{aligned} \quad (12)$$

где $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ – отклонение точки изображения от ее истинного положения – положения, которое занимала бы точка при отсутствии радиальной дисторсии; $k_1, k_2, \dots$ – коэффициенты радиальной дисторсии; $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ – расстояние от центра кадра до точки с координатами (x, y) .

Для практического применения достаточно определять коэффициент k_1 [13], тогда выражение (12) преобразуется к виду:

$$\Delta x_r = x k_1 r^2, \Delta y_r = y k_1 r^2. \quad (13)$$

Отклонения $\Delta x_r, \Delta y_r$ между измеренными координатами точки по горизонтали x' и вертикали y' и их истинными координатами x по горизонтали и y по вертикали соответственно равны [14]

$$\Delta x_r = x' - x, \quad \Delta y_r = y' - y. \quad (14)$$

Для определения коэффициента k_1 изменяют направление наблюдения так, чтобы центральная точка занимала на изображении положение А (рис. 1), характеризующееся равенством ординаты точки нулю, затем смещают направление наблюдения в вертикальной плоскости так, чтобы центральная точка занимала положение В. При этом истинные абсциссы точек А и В равны. Получим систему уравнений, используя определенные по изображению координаты точек А(x_A, y_A) и В(x_B, y_B):

$$\begin{cases} x'_A - x_A = k_1 \cdot x_A^3 \\ x'_B - x_B = x_B \cdot k_1 \cdot (x_B^2 + y_B^2) \\ y'_B - y_B = y_B \cdot k_1 \cdot (x_B^2 + y_B^2) \\ x_A = x_B. \end{cases} \quad (15)$$

При определении радиальной дисторсии наряду со смещением направления наблюдения в вертикальной плоскости используется смещение в горизонтальной плоскости и в произвольном направлении. Рассмотрим вариант определения радиальной дисторсии при смещении наблюдения в горизонтальном направлении и произвольных абсциссах точек А, В, при этом система уравнений (15) преобразуется к виду

$$\begin{cases} x'_A - x_A = x_A \cdot k_1 \cdot (x_A^2 + y_A^2) \\ y'_A - y_A = y_A \cdot k_1 \cdot (x_A^2 + y_A^2) \\ x'_B - x_B = x_B \cdot k_1 \cdot (x_B^2 + y_B^2) \\ y'_B - y_B = y_B \cdot k_1 \cdot (x_B^2 + y_B^2) \\ y_A = y_B. \end{cases} \quad (16)$$

В результате решения системы уравнений (16) определяется коэффициент k_1

$$k_1 = \frac{x'_A - x'_A / y'_A \cdot y}{y^3 \cdot (x'^2_A / y'^2_A + 1)}, \quad y = \frac{x'_B \cdot (x'^2_A / y'^2_A + 1) - x'_A \cdot (x'^2_B / y'^2_B + 1)}{-x'_A / y'_A \cdot (x'^2_B / y'^2_B + 1) + x'_B / y'_B \cdot (x'^2_A / y'^2_A + 1)}. \quad (17)$$

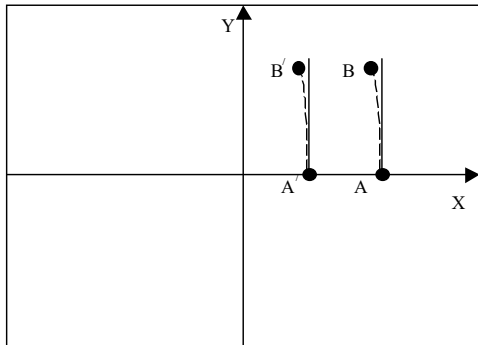


Рис. 1. Положения контрольной точки при определении параметров радиальной дисторсии

Fig. 1. The position of the control point when determining the parameters of radial distortion

Получим формулу, позволяющую корректировать искаженное изображение при известном коэффициенте радиальной дисторсии k_2 .

Согласно формулам (16), координаты (x', y') точки на изображении при дисторсии отличаются от координат точки при отсутствии дисторсии (x, y) на величину $(\Delta x, \Delta y)$:

$$x' = x + \Delta x, \quad y' = y + \Delta y. \quad (18)$$

Тогда исправленные координаты (x_{kor}, y_{kor}) точки равны

$$x_{kor} = x' - \Delta x, \quad y_{kor} = y' - \Delta y. \quad (19)$$

Для определения величин $(\Delta x, \Delta y)$ при известном коэффициенте k_1 , найденном по формуле (17), составим систему уравнений и решим ее относительно $(\Delta x, \Delta y)$:

$$\begin{cases} \Delta x = (x' - \Delta x) \cdot k_1 \cdot ((x' - \Delta x)^2 + (y' - \Delta y)^2) \\ \Delta y = (y' - \Delta y) \cdot k_1 \cdot ((x' - \Delta x)^2 + (y' - \Delta y)^2). \end{cases} \quad (20)$$

Выразим Δy через Δx

$$\Delta y = \Delta x \cdot \frac{y'}{x'}. \quad (21)$$

Подставив в первое уравнение системы (21) $\Delta y = \Delta x \cdot \frac{y'}{x'}$, получим кубическое уравнение с одним неизвестным Δx

$$\Delta x = (x' - \Delta x) \cdot k_1 \cdot \left((x' - \Delta x)^2 + \left(y' - \Delta x \cdot \frac{y'}{x'} \right)^2 \right). \quad (22)$$

В результате решения уравнения (22) по формулам Кордана при $k_1 > 0$ уравнение имеет единственное действительное решение Δx

$$\Delta x = \sqrt[3]{-q + (q^2 + p^3)^{0.5}} + \sqrt[3]{-q - (q^2 + p^3)^{0.5}}, \quad (23)$$

$$p = (3 \cdot k_1 \cdot (1 + y'^2 / x'^2))^{-1},$$

$$q = -x' \cdot (2 \cdot k_1 \cdot (1 + y'^2 / x'^2))^{-1}.$$

При $k_1 < 0$ уравнение (23) имеет несколько решений Δx , истинное из которых выбирается ограничением области допустимых значений Δx , размерами изображения X, Y и знаком величины Δx .

Математические модели определения $M_{kk}(K)$ и коррекции $M_{rd}(I_n(x, y) |_{x=\overline{1, X}, y=\overline{1, Y}})$ радиальной дисторсии ОС ОЭД позволяют провести коррекцию изображения путем расчета истинных $I_n(x, y)$ координат точек изображения

$$k_1 = M_{kk}(K), \quad (24)$$

$$I_n(x, y) = M_{rd}(M_{kk}(K), I_n(x, y) |_{x=\overline{1, X}, y=\overline{1, Y}}). \quad (25)$$

Моделирование. Для проведения экспериментальных исследований раз-

работанного метода выделения этикетки была разработана специальная программа. Моделирование проводилось на изображениях документов и этикеток.

Входными данными для программы является изображение, предположительно содержащее этикетку.

Выходными данными является изображение этикетки, выделенное из исходного.

Программа позволяет загружать изображения и сохранять выделенные изображения этикетки. Кроме того, в про-

грамме отображаются изображения, получаемые на промежуточных этапах обработки (а именно – после коррекции дисторсии и бинаризации).

При экспериментальном исследовании была создана база из 50 изображений.

При запуске программы появляется главное окно с панелями для прорисовки изображений и кнопками загрузки и сохранения. Результат обработки введенного изображения представлен на рис. 2.

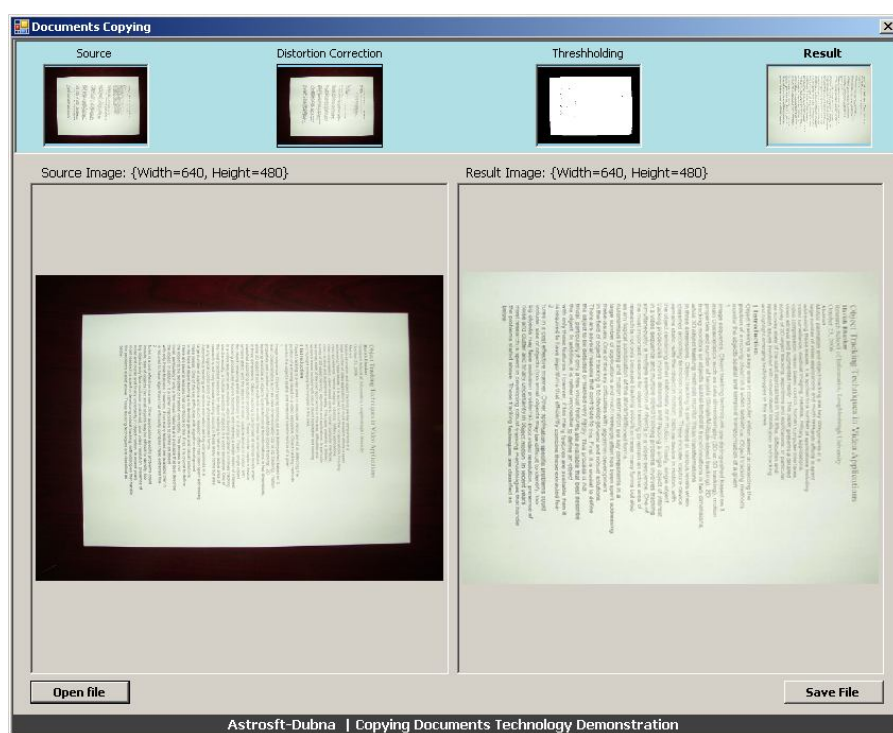


Рис. 2. Пример обработки изображения

Fig. 2. Image processing example

Область окна программы разделена на несколько областей. В двух нижних областях представлены: исходное изображение и выделенное из него изображение документа. В верхней области представлены изображения, получен-

ные на промежуточных этапах обработки. Увеличенные изображения, полученные на промежуточных этапах обработки, можно увидеть, выбрав их из верхнего ряда левой кнопкой мыши (рис. 3).

Кроме того, все изображения можно посмотреть в увеличенном виде, кликнув левой кнопкой мыши на выбранном изображении.

В случае недостаточного качества обрабатываемого изображения, а также

в том случае, если на обрабатываемом изображении этикетка или документ не найден, выдается следующее сообщение (рис. 4).

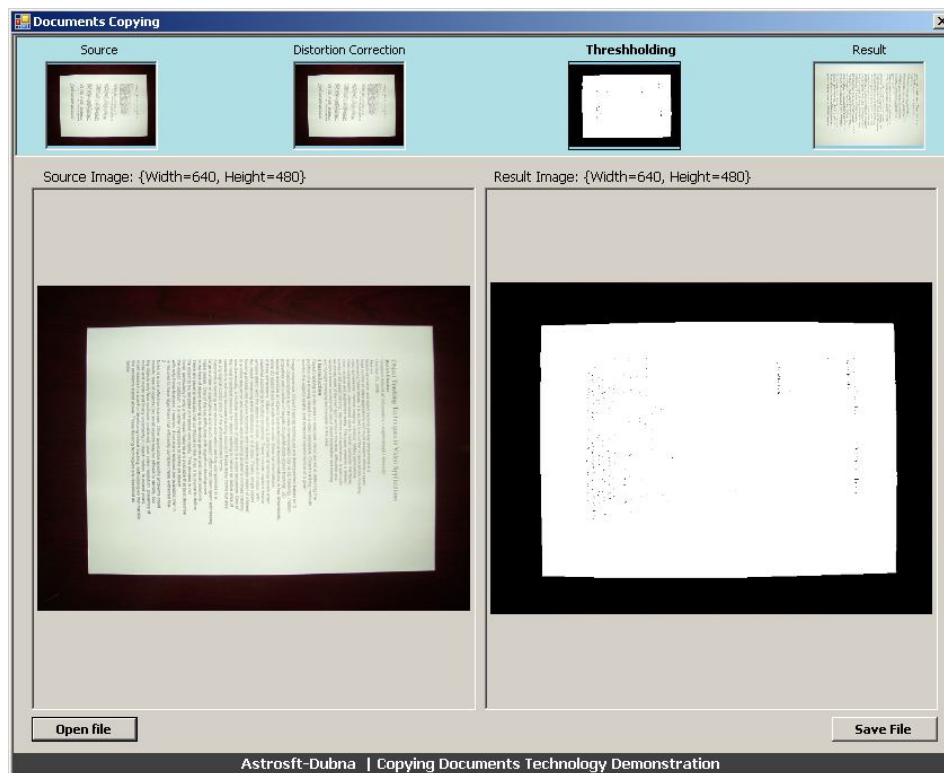


Рис. 3. Выбор изображения для обработки

Fig. 3. Image selection for processing



Рис. 4. Сообщение о недопустимости входного изображения

Fig. 4. Message about the inadmissibility of the input image

Результаты и их обсуждение

Результаты обработки тестовых изображений представлены в таблицах 1 и 2.

Экспериментальные исследования разработанного метода показали воз-

можность его применения в задачах обнаружения этикеток. Наряду с этим выявлен ряд недостатков, требующий их устранения, и пути возможной доработки программного обеспечения (табл. 2).

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Table 1

The results of experimental studies

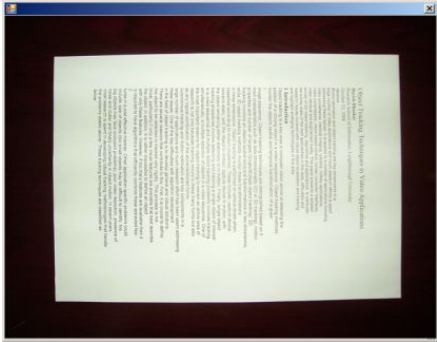
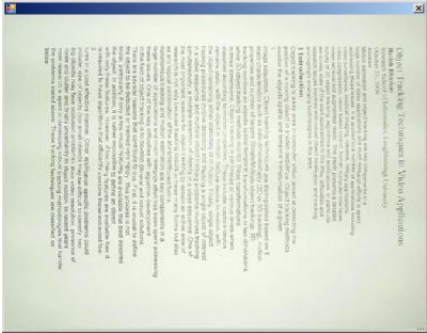
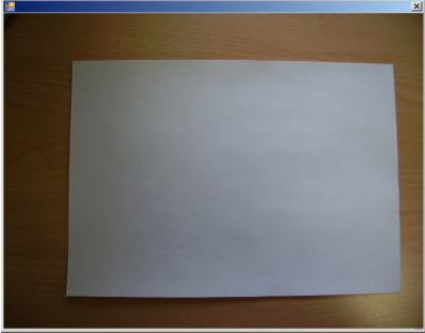
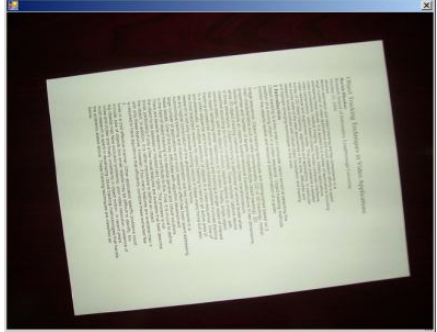
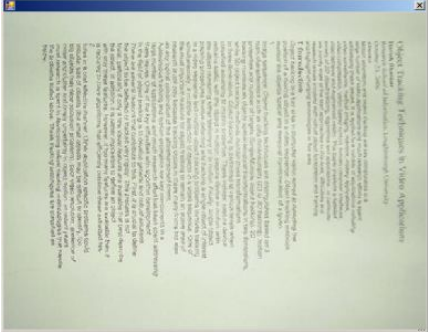
Исходное изображение	Результат обработки
	
	
	
	

Таблица 2

Анализ недостатков

Table 2

Analysis of deficiencies

Недостаток	Причина	Возможное устранение
Смазанные буквы на конечном изображении документа	Для поворота обнаруженного изображения используются стандартные алгоритмы растровой графики, не позволяющие получить четкие изображения при углах поворота, отличающихся от 90 и 180 градусов, что вызвано погрешностями округления функций синуса и косинуса при вычислении новых координат точек	Использование алгоритмов поворота, учитывающих особенности текста. Однако для этого может потребоваться дополнительное распознавание и перевод изображения в векторный формат, что сильно усложнит задачу
Время обработки изображений	Время обработки определяется, прежде всего, размером исходного изображения – чем больше изображение, тем больше время обработки	Возможно использование оптимизации вычислений, которая позволит в значительной степени уменьшить время обработки

Выводы

При решении задачи выделения изображения этикетки с целью определения нарушения качества ее нанесения распознавание текста не является основной задачей, в связи с чем дальнейшие исследования разработанного метода необходимо проводить в области оптими-

зации вычислений. Таким образом, разработанный метод может использоваться в устройствах получения и обработки изображений, функционирующих в автоматическом режиме и применяемых в системах технического зрения и контроля качества этикетирования.

Список литературы

1. Панищев В.С., Решетникова В.П., Чернецкая И.Е. Блок управления автоматизированной системой нанесения этикеток на подвижный объект // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 9. С. 58-62.

2. Панищев В.С., Славкова О.Б. Схема управления шаговым двигателем для автоматизированной системы нанесения этикетки на подвижный объект // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 2. С. 43-46.
3. Панищев В.С., Славкова О.Б. Алгоритм работы автоматической системы нанесения этикетки на подвижный объект // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика - 2011: сборник материалов II Международной научно-технической конференции. Курск, 2011. С. 152-155.
4. Devernay F., Faugeras O. Straight lines have to be straight // MVA. 2001. N13(1). P. 14-24.
5. Beyer H. Accurate calibration of CCD-cameras // Proc. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Urbana Champaign. IEEE CS Press, Piscataway, June 1992.
6. Tsai R. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // IEEE Robotics Autom, 1987. N3(4), P. 323-344.
7. Faugeras O. Toscani G. Structure from Motion using the Reconstruction and Reprojection Technique // IEEE Workshop on Computer Vision, Miami Beach, November-December, IEEE CS Press, Piscataway, 1987. P. 345-348.
8. Lavest J., Viala M., Dhome M. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration // Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision. Vol. 1 of Lecture Notes in Computer Science, Freiburg, Germany. Springer, Berlin Heidelberg New York, June 1998. P. 158-174.
9. Brown D. Close-range camera calibration // Photogrammetric Engineering, 1971, N37(8), P. 855-866.
10. Deriche R., Vaillant R., Faugeras O. From noisy edge points to 3D reconstruction of a scene: A robust approach and its uncertainty analysis // Proceedings of the 7th Scandinavian Conference on Image Analysis, Alborg, Denmark, August 1991. P. 225-232.
11. Shah S., Aggarwal J.K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation // Pattern Recognition, N29(11). P. 1175-1788.
12. Devernay F. A non-maxima suppression method for edge detection with sub-pixel accuracy // Technical report RR 2724, NRIA, 1995.
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1979. Vol. 9, No.1. P. 62-66.
14. Коростелев С.И. Программа для распознавания образов // Молодежь и XXI век: матер. XXXV межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов в области научных исследований: в 2 ч. Курск, 2007. Ч.1. С. 20-21.

Reference

1. Panishchev V.S., Reshetnikova V.P., Chernetskaya I.Ye. Blok upravleniya avtomatizirovannoy sistemoy naneseniya etiketok na podvizhnyy ob"yekt. [Control block of automated system for label gluing to mobile object] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye = Journal of Instrument Engineering*, 2010, vol. 53, no. 9, pp. 58-62 (In Russ.).
2. Panishchev V.S., Slavkova O.B. Skhema upravleniya shagovym dvigatelem dlya avtomatizirovannoy sistemy naneseniya etiketki na podvizhnyy ob"yekt [Control circuit of stepper motor for automated system of moving objects labeling] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye = Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 2, pp. 43-46 (In Russ.).
3. Panishchev V.S., Slavkova O.B. [The algorithm of the automatic system for applying labels to a moving object] *Informatsionno-izmeritel'nyye diagnosticheskiye i upravlyayushchiye sistemy. Diagnostika - 2011. Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [In the collection: Information-measuring diagnostic and control systems. Diagnostics - 2011. Collection of materials of the II International Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2011, pp. 152-155 (In Russ.).
4. Devernay F., Faugeras O. Straight lines have to be straight F. Devernay. *MVA*, 2001, no.13(1), pp. 14-24.
5. Beyer H. Accurate calibration of CCD-cameras. Proc. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Urbana Champaign. IEEE CS Press, Piscataway, June 1992.
6. Tsai R. A versatile camera calibration technique for highaccuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Robotics Autom*, 1987, no.3(4), pp. 323-344.
7. Faugeras O., Toscani G. Structure from Motion using the Reconstruction and Reprojection Technique. IEEE Workshop on Computer Vision, Miami Beach, November-December, IEEE CS Press, Piscataway, 1987, pp. 345-348.
8. Lavest J., Viala M., Dhome M. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration. Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision. Vol. 1 of Lecture Notes in Computer Science, Freiburg, Germany. Springer, Berlin Heidelberg New York, June 1998, pp. 158-174.
9. Brown D. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 1971, N37(8), pp. 855-866.
10. Deriche R., Vaillant R., Faugeras O. From noisy edge points to 3D reconstruction of a scene: A robust approach and its uncertainty analysis. Proceedings of the 7th Scandinavian Conference on Image Analysis, Alborg, Denmark, August 1991, pp. 225-232.

11. Shah S., Aggarwal J.K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation. *Pattern Recognition*, no.29(11), pp. 1175–1788.
12. Devernay F. A non-maxima suppression method for edge detection with subpixel accuracy. Technical report RR 2724, NRIA, 1995.
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 1979, vol. 9, no.1, pp. 62-66.
14. Korostelev S.I. [Program for pattern recognition]. *Mater. XXXV mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov v oblasti nauchnykh issledovaniy: "Molodezh' i XXI vek"*. [Materials of XXXV interuniversity scientific and technical conference of students and graduate students in the field of scientific research. "Youth and the 21st Century"]. Kursk, 2007, pp. 20-21 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Волков Денис Андреевич, ассистент,
Российский государственный университет
нефти и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина, г. Москва,
Российская Федерация,
e-mail: volkov.d.a.@mail.ru

Denis A. Volkov, Assistant Lecturer, Gubkin
Russian State University of Oil and Gas
(National Research University), Moscow,
Russian Federation
e-mail: volkov.d.a.@mail.ru

Панищев Владимир Славиевич, кандидат
технических наук, старший научный сотрудник,
Центр информационных технологий в проекти-
ровании Российской академии наук, г. Москва,
Российская Федерация,
e-mail: gskunk@yandex.ru

Vladimir S. Panishchev, Candidate
of Engineering Sciences, Senior Research Fellow,
Center of Information Technologies in Design
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: info@ditc.ras.ru

Труфанов Максим Игоревич, кандидат
технических наук, старший научный сотрудник,
Центр информационных технологий в проекти-
ровании Российской академии наук, г. Москва,
Российская Федерация,
e-mail: info@ditc.ras.ru

Maksim I. Truphanov, Candidate
of Engineering Sciences, Senior Research Fellow,
Center of Information Technologies in Design
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: info@ditc.ras.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-148-159>

Модель формирования портфеля проектов коммерческого банка на основе теории игр

З. А. Усманова ¹, А.А. Ханова ¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», ул. Татищева, 16, г. Астрахань, 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Цель исследования: формирование портфеля проектов коммерческого банка на основе теории игр. Существующие на сегодняшний день алгоритмы и модели формирования портфеля проектов коммерческого банка налагают определенные ограничения на начальные условия, и не принимают во внимание дифференциацию критериев отбора в зависимости от конкретных типов банковских проектов, поэтому необходимо разработать модель, учитывающую специфику банковского бизнеса и позволяющую находить требуемые решения.

Методы. Метод построения модели на основе теории игр позволяет определить структуру и системные взаимосвязи между составляющими портфеля проектов и их характеристики. Представлено формализованное описание модели портфеля проектов коммерческого банка в форме кооперативной игры с трансферабельной полезностью. Дано подробное описание поиска оптимального распределения в кооперативной игре. Сформулированы аксиомы Л.С. Шепли, отражающие справедливость дележей исходя из вклада каждого игрока в выигрыш коалиции, относительно модели портфеля проектов.

Результаты. Выявлены особенности построения модели портфеля проектов, включающие в себя многокритериальность и взаимосвязи между отдельными банковскими проектами, синергетический эффект их совместного осуществления. В общем виде задача формирования портфеля проектов коммерческого банка заключается в максимизации предполагаемого суммарного эффекта от реализации портфеля проектов. Совокупность всех проектов портфеля должна доставлять ему наибольшую эффективность. Приведено описание реализации предложенной модели формирования портфеля проектов коммерческого банка на примере реальных банковских проектов. В результате вычислений получено оптимальное решение кооперативной игры, представляющее последовательность, в которой банковские проекты будут включены в портфель.

Заключение. Разработанная и реализованная в статье модель формирования портфеля проектов коммерческого банка с применением теории игр позволяет учесть взаимосвязи между банковскими проектами, синергетический эффект их совместной реализации и найти оптимальное решение в условиях риска и неопределенности.

Ключевые слова: портфель проектов; коммерческие банки; теория игр; модель; синергетический эффект; кооперативные игры.

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

Для цитирования: Усманова З. А., Ханова А.А. Модель формирования портфеля проектов коммерческого банка на основе теории игр // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 148-159. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-148-159>.

Статья поступила в редакцию 15.04.2019

Статья подписана в печать 30.05.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-148-159>

A Model of Commercial Bank Projects Portfolio Building Based on the Game Theory

Zlata A. Usmanova¹, Anna A. Khanova¹ ✉

¹ Astrakhan State Technical University, 16, Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to study building a commercial bank project portfolio based on the game theory. The existing algorithms and models for the formation of a commercial bank project portfolio impose certain restrictions on the initial conditions, and do not take into account the differentiation of selection criteria depending on specific types of bank projects, therefore it is necessary to develop a model that takes into account the specifics of the banking business and makes it possible to find the required solutions.

Methods. A method for building a model based on the game theory allows us to determine the structure and system relationships between the components of the project portfolio and their characteristics. The article presents a formalized description of the commercial bank project portfolio model in the form of a cooperative game with a transferable utility. A detailed description of the search for the optimal distribution in the cooperative game is given. The Shapley axioms are laid down reflecting the fairness of the sharing based on the contribution of each player to the winning coalition regarding the project portfolio model.

Results. The specific features of building a model of a projects portfolio, including multicriteriality and the relationship between individual bank projects and the synergetic effect of their joint implementation are revealed. In general, the task of building a project portfolio of a commercial bank is to maximize the expected total effect of the project portfolio implementation. The total of all portfolio projects should provide the greatest efficiency. The article describes the implementation of the proposed model of commercial bank project portfolio building through the example of real bank projects. As a result of calculations, the optimal solution of the cooperative game which is a sequence according to which bank projects will be included in a portfolio was obtained.

Conclusion. Thus, the developed and implemented in the article model of formation of a commercial bank project portfolio using the game theory allows taking into account the relationship between bank projects, the synergetic effect of their joint implementation and finding the optimal solution in terms of risk and uncertainty.

Keywords: project portfolio; commercial banks; game theory; model; synergistic effect; cooperative games.

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

For citation: Usmanova Z. A., Khanova A.A. A Model of Commercial Bank Projects Portfolio Building Based on the Game Theory. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 148-159 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-148-159>.

Received 15.04.2019

Accepted 30.05.2019

Введение

Для достижения конкурентных преимуществ в банковском бизнесе недостаточно успешно выполнять отдельные проекты, необходимо согласованное управление всей совокупностью проектов банков. В связи с этим актуальной является задача формирования портфеля проектов коммерческого банка (ППКБ).

Формированию портфеля проектов посвящены работы как отечественных, так и зарубежных авторов, при этом применяется обширный математический аппарат [1]. Вопросы автоматизации формирования портфеля рассмотрены в работах Аньшина В.М. [2], Матвеева А.А. [3] и др. Формализованные алгоритмы проектного подхода приведены в общем виде в работах Божко Л.М. [4], Буркова Д.Н. и Новикова Д.А. [5], Анфилатова В. С. [6].

Существующие на сегодняшний день алгоритмы и модели формирования портфеля проектов налагают определенные ограничения на начальные условия и не принимают во внимание дифференциацию критериев отбора в зависимости от конкретных типов банковских проектов (БП). В данной работе в основу модели формирования ППКБ было принято решение использовать методы теории игр. Так как теория игр представляет собой теоретические основы математических моделей принятия оптимальных решений, носящих характер конкурентной борьбы, в кото-

рых одна противоборствующая сторона выигрывает за счет другой стороны. Относительно задачи формирования ППКБ, проекты-претенденты на включение в портфель конкурируют друг с другом. Наряду с такой ситуацией в теории игр рассматриваются также ситуации риска и неопределенности, которые имеют различные модели и требуют разных критериев выбора оптимальных решений. **Цель работы** – формализация процесса формирования ППКБ за счет разработки модели на основе теории игр, учитывающей специфику банковского бизнеса и позволяющей находить требуемые решения.

Материалы и методы решения задачи

Применение методов теории игр [7] позволит учесть многокритериальность и взаимосвязи между отдельными БП, синергетического эффекта их совместного осуществления [5].

Под эффектом синергизма ППКБ понимается ситуация, когда получаемая полезность от реализации ППКБ превышает полезность от реализации проектов портфеля по отдельности, обратное явление именуется диссинергией. При определении взаимного влияния БП в ППКБ будем использовать z_{cik} - знак синергетического эффекта (СЭ) (положительный, нейтральный, отрицательный).

Положительный СЭ $z_{cik} = +1$ сводится к экономии от совместного использования ресурсов или к созданию

одним из БП ресурсов для функционирования другого БП.

Отрицательный СЭ $z_{cik} = -1$ объясняется конкуренцией за ресурсы или сокращением ресурсов, необходимых для функционирования одного БП, в результате реализации другого БП.

Нейтральный СЭ $z_{cik} = 0$ означает отсутствие взаимовлияния между банковскими проектами.

В теории игр существует раздел, посвященный изучению формирования коалиций между игроками и определения выигрыша – кооперативные игры [8]. В рассматриваемой ситуации БП образуют коалиции (подмножества всех БП), направленные на увеличение выигрыша.

В общем виде задача формирования ППКБ заключается в максимизации предполагаемого суммарного эффекта от реализации ППКБ [9]. Совокупность всех проектов портфеля должна доставлять ему наибольшую эффективность – это условие является ключевым в управлении портфелями проектов [10]. В состав портфеля могут быть включены и малоэффективные проекты, но совокупность всех проектов должна быть наиболее эффективна [11].

Опишем модель формирования ППКБ в форме кооперативной игры с трансферабельной полезностью. Под кооперативными играми с трансферабельной полезностью (с побочными платежами) понимаются игры, в которых полезность измеряется в универсальных, общепринятых для всех

участников игры единицах и может передаваться от игрока к игроку без потерь и трансформаций [7]. В качестве платежа БП будет использован агрегированный показатель.

Каждая кооперативная игра задается парой (Pr, v) , где $Pr = \{Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_n\}$ – множество игроков (множество всех БП, прошедших первоначальный отбор), v – характеристическая функция $2^{Pr} \rightarrow R$, где 2^{Pr} – множество всех коалиций в Pr . Игра по формированию ППКБ проводится среди фиксированного числа БП [12]. Характеристическая функция v описывает величину выгоды, которую подмножество БП может достичь путем объединения в коалицию.

Коалицией $S_{pr} \in Pr$ в данной игре по формированию ППКБ будем считать любое непустое подмножество БП. Большой коалицией в кооперативных играх с трансферабельной полезностью называется множество всех игроков. Пустая коалиция $v(\emptyset) = 0$ не получает выигрыша.

Кооперативная игра по формированию ППКБ является супераддитивной, т.е. для всех коалиций банковских проектов S_{pr1}, S_{pr2} выполняется условие $v(S_{pr1}) + v(S_{pr2}) \geq v(S_{pr1} \cup S_{pr2})$. Данное свойство означает, что при добавлении любого БП к любой коалиции S_{pr} , полезность коалиции S_{pr} не уменьшится. Игра по формированию ППКБ проводится среди фиксированного числа БП.

Ключевым понятием в теории кооперативных игр с трансферабельной

полезностью является дележ. Дележом в кооперативной игре (Pr, v) в условиях характеристической функции v называется вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, удовлетворяющий условиям индивидуальной и коллективной рациональности.

Условие индивидуальной рациональности предполагает, что при дележе каждый игрок из $Pr = \{Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_n\}$ должен получить не меньше, чем, если бы он не входил ни в одну из коалиций S_{pr} :

$$\begin{aligned} x(Pr) &= v(Pr), \\ x_i &\geq v(\{i\}), \end{aligned} \quad (1)$$

где x_i – выигрыш, который вектор дележа $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ обязывает передать БП i .

Коллективная рациональность означает, что сумма выигрышей БП должна соответствовать возможностям, т.е. если сумма выигрышей всех игроков меньше, чем $v(x)$, то игрокам незачем вступать в коалицию. Обозначим выигрыш коалиции как $x(S_{pr})$:

$$x(S_{pr}) = \sum_{i \in S} x_i. \quad (2)$$

Если же потребовать, чтобы сумма выигрышей была больше, чем $v(x)$, то это значит, что игроки должны делить между собой сумму большую, чем у них есть.

Таким образом, модель формирования ППКБ описана в форме кооперативной игры (Pr, v) . В общем виде решением кооперативной игры является некоторое правило, которое определяет распределение, обладающее какими-то достоинствами, например удовлетво-

ряющими изначально заданной системе аксиом.

Существует несколько подходов к поиску оптимального распределения в кооперативной игре, наиболее распространенным на практике считается подход, предложенный американским экономистом и математиком Л.С. Шепли [13]. Подход строится на основании аксиом, отражающих справедливость дележей исходя из вклада каждого игрока в выигрыш коалиции [14].

Для решения кооперативной игры (Pr, v) по формированию ППКБ методом Л.С. Шепли сформулируем следующие аксиомы:

1. Фиксированность. Проведение игры (Pr, v) среди фиксированного числа банковских проектов, прошедших первоначальный отбор.

2. Симметричность. Решение не зависит от переупорядочений игроков (БП), при которых остаются неизменными значения характеристической функции игры (Pr, v) . То есть игроки, одинаково входящие в игру, должны получать одинаковые выигрыши.

3. Эффективность. При распределении общего выигрыша не выделяется и не взимается ничего БП, не вносящему вклада ни в какую коалицию. Для БП i для любой коалиции S_{pr} , содержащей i , выполняется:

$$v(S_{pr}) - v(S_{pr} \setminus \{i\}) = 0, \quad (3)$$

где $v(S_{pr}) - v(S_{pr} \setminus \{i\})$ – вклад игрока i , приращение выигрыша коалиции при

его участия по сравнению с выигрышем коалиции без этого игрока.

4. Агрегация. При участии игроков в двух играх их выигрыш в отдельных играх должен складываться.

Доказано (теорема Шепли), что для любой кооперативной игры существует единственное распределение выигрыша, удовлетворяющее вышеперечисленным аксиомам, и это распределение — вектор Шепли [15].

Пронумеруем БП, прошедшие первоначальный отбор, в некотором порядке. Формирование коалиции S_{pr} будет осуществляться путем добавления БП по одному в указанном порядке. При добавлении БП i формируется некоторая коалиция S_{pr} . Присоединяясь к этой коалиции S_{pr} БП i увеличивает достижимый выигрыш на $v(S_{pr}) - v(S_{pr} \setminus \{i\})$. Эта прибавка является вкладом БП в большую коалицию. Вклад i -го БП зависит от порядка формирования большей коалиции.

Если формировать большую коалицию добавляя игроков по одному в случайном порядке, то прибавка, вносимая БП i , будет случайной величиной.

Вектор Шепли — математическое ожидание вклада каждого БП, если большая коалиция формируется случайным образом. Как следствие вектор Шепли всегда единственный:

$$\Phi_i(v) = \sum_{i \in S_{pr}} \frac{(s_{pr}-1)!(n-s_{pr})!}{n!} (v(S_{pr}) - v(S_{pr} \setminus \{i\})), \quad (4)$$

где n — число игроков (БП); s_{pr} — число участников коалиции S_{pr} .

Модель формирования ППКБ с применением теории игр позволяет учесть взаимосвязи между БП, синергетический эффект их совместной реализации и найти оптимальное решение в условиях риска и неопределенности.

Результаты и их обсуждение

Формирование ППБ с применением теории игр состоит из ключевых этапов, представленных на рис. 1. Для реализации модели формирования ППКБ на основе теории игр пронумеруем БП (табл. 1), в некотором порядке k , k — некоторая последовательность чисел $\{1, 2 \dots n\}$. Для проведения игры с трансферабельной полезностью необходимо оценить взаимосвязи между БП и ожидаемый синергетический эффект от их совместной реализации. Для этого воспользуемся методом экспертных оценок. При оценке экспертам необходимо определить ожидаемый синергетический эффект от совместной реализации БП. При оценке использована порядковая шкала как наиболее подходящая для дальнейших вычислений, т.к. в данной шкале допустимы все строго возрастающие преобразования [10].

Также, в результате многочисленных опытов доказано, что человек более правильно отвечает на вопросы качественного, например, сравнительного, характера, чем количественного.

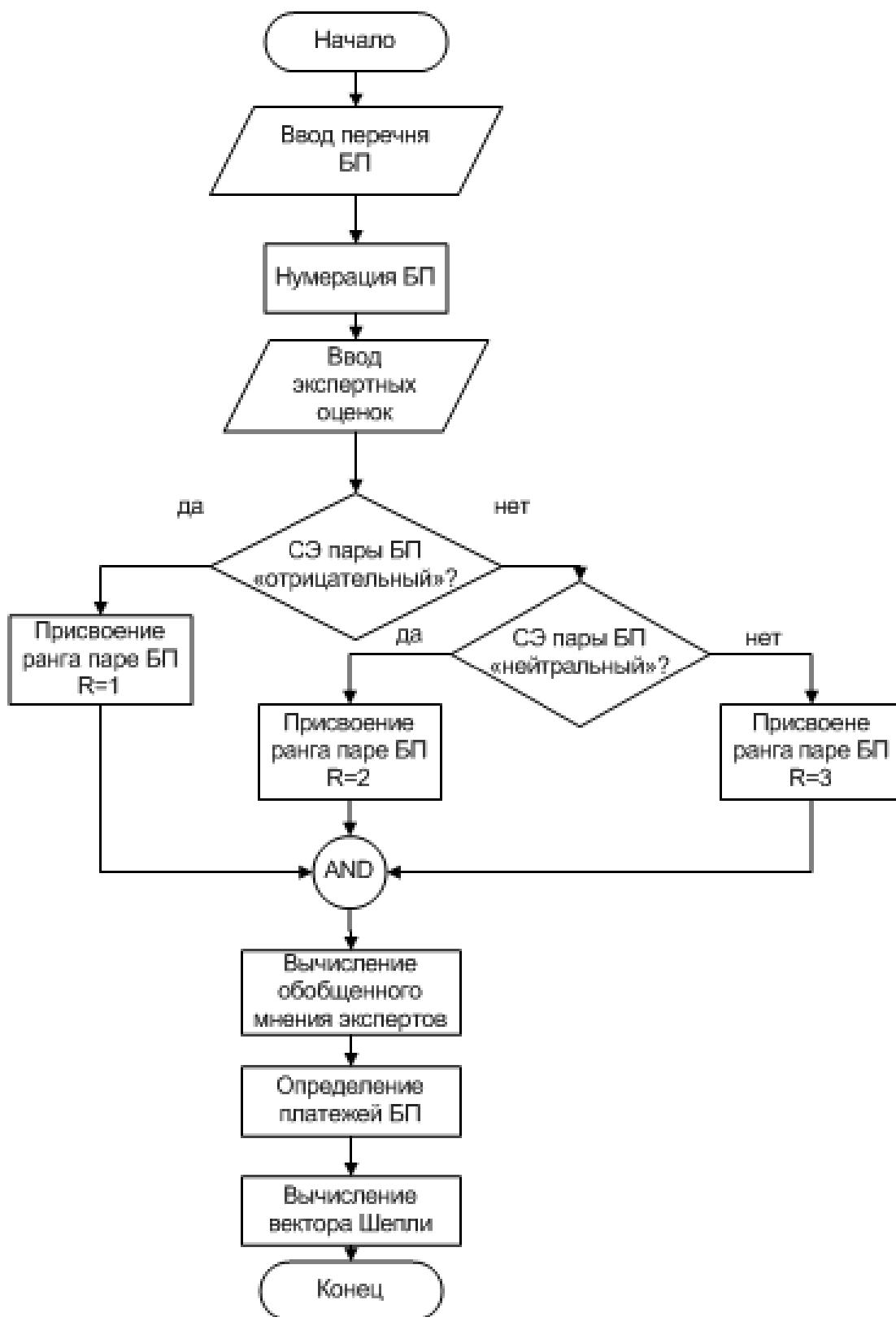


Рис. 1. Алгоритм формирования ППКБ

Fig. 1. Algorithm for CBPP building

Таблица 1

Список БП для формирования ППКБ

Table 1

List of BP for CBPP building

№ БП	Название БП	АП
bp_1	Создание дочернего КБ ориентированного на экспресс-кредитование	1.3097
bp_2	Партнерство с платежными системами	1.36
bp_3	Упрощение банковских процедур получения потребительского кредита	1.0502
bp_4	Система бесплатного обучения риэлторов по ипотечным программам	1.2
bp_5	Партнерство с образовательными организациями	1.35

Экспертам предложено выразить свое мнение относительно пар БП с присвоением им рангов 1 – если пара БП при совместной реализации дает отрицательный СЭ, 2 – если пара БП при совместной реализации дает нейтральный СЭ, 3 – если пара БП при совместной реализации дает положительный СЭ.

Для вычисления обобщенного экспертного мнения используем метод медианных рангов. Суть метода состоит в том, что ответы всех экспертов по каж-

дой из пар БП необходимо расположить в порядке неубывания, и затем найти в получившемся ряду медиану. В результате формируется матрица взаимосвязей БП (табл. 2).

Далее необходимо определить платежи для каждого проекта, в качестве платежа использованы АП, умноженные для удобства вычислений вектора Шепли на 100, и округленные до целых (табл. 3).

Таблица 2

Экспертная матрица взаимосвязей БП

Table 2

Expert BP interrelations matrix

№ БП	bp_1	bp_2	bp_3	bp_4	bp_5
bp_1	-	+1	+1	0	0
bp_2	+1	-	0	0	-1
bp_3	+1	0	-	0	0
bp_4	0	0	0	-	+1
bp_5	0	-1	0	+1	-

Таблица 3

Платежи БП в кооперативной игре

Table 3

BP payments in a cooperative game

БП	Платежи	БП (синергетический эффект)	Платежи
bp_1	131	$bp_1 + bp_2 (bp_2 + bp_1)$	534
bp_2	136	$bp_1 + bp_3 (bp_3 + bp_1)$	472
bp_3	105	$bp_2 + bp_5 (bp_5 + bp_2)$	134
bp_4	120	$bp_4 + bp_5 (bp_5 + bp_4)$	510
bp_5	135		

Для учета синергетического эффекта от совместной реализации будем считать, что связи со значением $z_{cik} = +1$ получают в сумме в 2 раза больше, а связи со значением $z_{cik} = -1$ в 2 раза меньше, по сравнению с нейтральным синергетическим эффектом $z_{cik} = 0$.

Сформируем все возможные коалиции для банковских проектов (претендентов на включение в портфель) и вычислим для каждого вектор Шепли по формуле 4. В результате вычисления вектора Шепли БП будут включены в ППКБ в следующей очередности $\{bp_1, bp_2, bp_5, bp_4, bp_3\}$.

Выводы

Проведен анализ существующих методов формирования ППКБ, выявляе-

ны их недостатки. Формализована задача формирования ППКБ на основе теории игр. Обоснован и применен поиск оптимального решения кооперативной игры с трансферабельной полезностью по формированию ППКБ с помощью аксиом Л.С. Шепли. Приведена реализация предложенной модели на примере реальных банковских проектов. Дальнейшими направлениями развития проведенного исследования могут быть следующие: использование технологий имитационного моделирования для процесса управления ППКБ – с целью исследования различных ситуаций, связанных с включением в состав ПП новых проектов и исключением из него существующих проектов по разным причинам.

Список литературы

1. Безденежных Е.Ю., В.Л. Попов Особенности проектного управления в банковской сфере на примере западно-уральского банка ОАО «Сбербанк России» // Управление проектами и программами. 2015. № 3. С. 206-210.

2. Модели управления портфелем проектов в условиях неопределенности / В.М. Аньшин, И.В. Демкин, И.М. Никонов, И.Н. Царьков. М.: Издательский центр МАТИ, 2014. 117 с.
3. Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В. Модели и методы управления портфелями проектов. М.: ПМСОФТ, 2005. 206 с.
4. Божко Л.М. Применение проектного подхода в управлении организационными изменениями: ограничения и перспективы // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. 2014. № 1-1. С. 108-113.
5. Бурков Д.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами: научно-практическое издание. М.: СИНТЕГ-ГЕО, 2010. 188 с.
6. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении / под ред. А. А. Емельянова. М. : Финансы и статистика, 2002. 368 с: ил.
7. Конюховский П.В., Малова А.С. Теория игр. М.: Юрайт, 2014. 454 с.
8. Полякова О.Ю., Булкин С.М. Формирование конкурентной стратегии коммерческого банка на основе методологии теории игр // Бизнес информ. 2013. № 12. С. 115-119.
9. Егорычева С.Б. Моделирование оптимального портфеля инновационных проектов банка // Экономика и банки. 2016. № 1. С. 26-32.
10. Ханова А.А. Концепция системы интеллектуального управления стратегически-ориентированным предприятием // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2011. № 1. С. 187-193.
11. Павлов А. Н. Управление проектами на основе стандарта PMI PMBOK . Изложение методологии и опыт применения. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 271 с.
12. Черкасова М.С. Теория игр: основные понятия, типы игр, примеры // Молодой ученый. 2018. № 13 . С. 9-22.
13. Акимов В.П., Kerby W. Значения для кооперативных игр. Обобщение теоремы единственности Шепли // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 4. С. 77-80.
14. Гусев В.В., Мазалов В.В. Устойчивые по Оуэну коалиционные разбиения в играх с векторными платежами // Математическая Теория Игр и ее Приложения. 2018. № 3. С. 3-23.
15. Maschler M. Game Theory/M. Maschler, E. Solan, S. Zamir. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 979 p.

Reference

1. Bezdenzhnykh Ye.Yu., Popov V.L. Osobennosti proektnogo upravleniya v bankovskoy sfere na primere zapadno-uralskogo banka OAO «Sberbank Rossii» [Features of project management in the bank sphere on an example of the West Ural bank]. *Upravlenie*

proektami i programmami [Project management and programs], 2015, no. 3, pp. 206-210 (In Russ.).

2. Anshin V.M., Demkin I.V., Nikonov I.M., Tsarkov I.N. Modeli upravleniya portfelem proek-tov v usloviyakh neopredelennosti [Models of management of a portfolio of projects in the conditions of indeterminacy]. Moscow, 2014, 117 p. (In Russ.).

3. Matveev A.A., Novikov D.A., Tsvetkov A.V. Modeli i metody upravleniya portfelyami proektov [Models and methods of management of portfolios of projects]. Moscow, 2005, 206 p. (In Russ.).

4. Bozhko L.M. Primenenie proektnogo podkhoda v upravlenii organizatsionnymi izmeneniyami: ogranicheniya i perspektivy [Application of design approach in management of organizational changes: restrictions and prospects]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki* = *News of the Tula state university. Economic and jurisprudence*, 2014, no. 1-1, pp. 108-113 (In Russ.).

5. Burkov D.N., Novikov D.A. Kak upravlyat proektami. Nauchno-prakticheskoe izdanie [How to operate projects: Scientific and practical edition]. Moscow, 2010. 188 p. (In Russ.).

6. Anfilatov V. S., Yemelyanov A. A., Kukushkin A. A. Sistemnyy analiz v upravlenii [Systems analysis in management]/ Moscow, Finance and statistics Publ., 2002, 368 p. (In Russ.).

7. Konyukhovskiy P.V. Teoriya igr [Game theory]. Moscow, Yurayt Publ., 2014, 454 p. (In Russ.).

8. Polyakova O.Yu., Bulkin S.M. Formirovanie konkurentnoj strategii kommercheskogo banka na osnove metodologii teorii igr [Forming of competitive strategy of commercial bank on the basis of games theory methodology]. *Biznes-inform* = *Business an inform*, 2014, no. 12, pp. 115-119 (In Russ.).

9. Egorycheva S.B. Modelirovanie optimal'nogo portfelja innovacionnyh proektov banka [Modeling of an optimal portfolio of the innovation projects of bank]. *Ekonomika i banki* = *Economy and banks*, 2016, no. 1, pp. 26-32 (In Russ.).

10. Khanova A.A. Kontseptsiya sistemy intellektualnogo upravleniya strategicheskio-orientirovannym predpriyatiem [The concept of system of intellectual management of the strategic focused enterprise]. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO* = *Economy, statistics and information science. UMO bulletin*, 2011, no. 1, pp. 187-193 (In Russ.).

11. Pavlov A. N. Upravlenie proektami na osnove standarta PMI PMBOK . Izlozhenie metodologii i opyt primeneniya [Project management on the basis of the PMI PMBOK standard. Statement of methodology and experience of application]. Moscow, 2014, 271 p. (In Russ.).

12. Cherkasova M.S. Teorija igr: osnovnye ponjatija, tipy igr, primery [Games theory: basic concepts, types of games, examples]. *Molodoj uchenyj* = *Young scientist*, 2018, no. 13, pp. 9-22 (In Russ.).

13. Akimov V.P., Kerby W. Znachenija dlja kooperativnyh igr. obobshhenie teoremy edinstvennosti Shepli [Values for cooperative games. synthesis of the theorem of uniqueness of Shapley]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatie reshenij* = *Artificial intelligence and decision-making*, 2010, no. 4, pp. 77-80 (In Russ.).

14. Gusev V.V. Ustojchivye po Oujenu koalicionnye razbienija v igrach s vektornymi platezhami [Coalition splittings, steady on Owen, in games with vector payments]. *Matematicheskaja Teorija Igr i ee Prilozhenija* = *Mathematical Games theory and its Applications*, 2018, no. 3, pp. 3-23 (In Russ.).

15. Maschler M. Game Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 979 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Злата Артуровна Усманова, аспирант,
ФБГОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет», г. Астрахань,
Российская Федерация,
e-mail: zлата.usmanova@yandex.ru

Zlata A. Usmanova, Post-Graduate Student,
Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation,
e-mail: zлата.usmanova@yandex.ru

Анна Алексеевна Ханова, доктор технических
наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский
государственный технический университет»,
г. Астрахань, Российская Федерация,
e-mail: akhanova@mail.ru

Anna A. Khanova, Doctor of Engineering
Sciences, Professor, Astrakhan State Technical
University, Astrakhan, Russian Federation,
e-mail: akhanova@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>

Особенности применения датчиков тока и напряжения при расчёте несимметрии электрической сети

Р. Ю. Закурдаев¹, И. Е. Чернецкая¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: white731@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является рассмотрение основных особенностей применения датчиков тока и напряжения при определении коэффициента несимметрии электрической сети. Важным вопросом также является значение погрешностей средств измерения, при котором влияние на определение коэффициента несимметрии не оказывается.

Методы. В статье рассмотрены классификации основных датчиков тока и напряжения. Показан пример реализации одного из вариантов датчика напряжения и аналого-цифрового преобразователя. Пояснена суть процесса симметрирования, рассмотрены различные коэффициенты несимметрии, приведены поясняющие формулы. Упомянуты главные требования к схемам измерения токов и напряжений и к вычислительной обработке сигналов. В частности, рассмотрены такие важные моменты, как определение угла сдвига фаз, определение параметров сети и учёт влияния погрешностей измерения на определение коэффициента несимметрии. Рассмотрен вопрос определения угла сдвига фаз и указана необходимость его определения. Пояснено, что при определении параметров сети необходимо соблюдать высокую точность измерений.

Результаты. Рассмотрено влияние инструментальной погрешности измерений на определение коэффициента несимметрии и определён класс точности приборов, ниже которого при определении коэффициента несимметрии может возникнуть ошибка. При определении класса точности приборов, для которых возникает недопустимая ошибка, упоминается вероятностная модель распределения мощностей трёхфазной электрической сети, приводится графическое описание этой модели. Показано определение наборов коэффициентов несимметрии до симметрирования, после симметрирования и после симметрирования с учётом ошибки. Упомянется, что при определении данных наборов применяются веса в качестве повышающих и понижающих коэффициентов для слагаемых, входящих в набор. Вводится коэффициент, показывающий, насколько процентов изменится снижение несимметрии из-за влияния ошибки. Рассматривается зависимость этого коэффициента от величины погрешности измерения.

Заключение. Делается вывод о величине погрешности, при котором влияние на определение коэффициента несимметрии не оказывается.

Ключевые слова: датчики тока; датчики напряжения; несимметрия; электрическая сеть; симметрирование.

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

Для цитирования: Закурдаев Р. Ю., Чернецкая И. Е. Особенности применения датчиков тока и напряжения при расчёте несимметрии электрической сети // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 160-169. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>.

Статья поступила в редакцию 12.03.2019

Статья подписана в печать 04.04.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>

Specific Features of Application of Current and Voltage Transducers When Calculating Electrical Network Unbalance

Roman Yu. Zakurdaev ¹, Irina E. Chernetskaya ¹ ✉

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

✉ e-mail: white731@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this article is to consider the main features of the application of current and voltage transducers determining the electrical network unbalance factor. Also, an important issue is the value of measuring instruments inaccuracy, at which there is no impact on the unbalance factor determining.

Methods. The article describes classifications of main current and voltage transducers. An example of the implementation of one of the voltage transducer and analog-to-digital converter variants is shown. The essence of the process of balancing is explained, various unbalance factors are considered, explanatory formulae are provided. The main requirements for current and voltage measurement circuits and for computational signal processing are mentioned. In particular, such important points as determining the phase angle, determining the network parameters and consideration of the influence of measurement errors on the determination of the unbalance factor are studied. The issue of determining the phase angle is considered and the need for its determination is indicated. It is explained that when determining the network parameters, high precision of measurement is required.

Results. The impact of the instrumental error of measurements on the determination of the unbalance factor is considered, and instruments rating below which an error may occur while finding the unbalance factor is determined. When determining the instrument rating at which an unacceptable error occurs, a probabilistic model of power distribution of a three-phase network is mentioned; a graphical description of this model is given. Determining the sets of unbalance factors before balancing, after balancing and after balancing taking into account the error, is provided. It is mentioned that in determining these sets, weights are used as increasing and decreasing factors for the terms included in the set. The factor showing the percentage of the decrease of unbalance changes due to the effect of the error is introduced. The dependence of this factor on the measurement error is considered.

Conclusion. A conclusion on the value of the error which does not impact the determination of the unbalance factor is provided.

Keywords: current transducers; voltage transducers; unbalance; electrical network; balancing.

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

For citation: Zakurdaev R. Yu., Chernetskaya I. E. Specific Features of Application of Current and Voltage Transducers When Calculating Electrical Network Unbalance. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 160-169 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-160-169>.

Received 12.03.2019

Accepted 04.04.2019

Введение

Определение несимметрии токов и напряжений электрической сети имеет важное практическое значение. Коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательностям используются в ГОСТе¹ и являются одним из параметров качества электроэнергии. При расчёте потерь электроэнергии используется коэффициент неравномерности токов. В устройствах снижения несимметрии также предварительно требуется оценить уровень несимметрии.

Целью данной статьи является рассмотрение основных особенностей применения датчиков тока и напряжения при определении коэффициента несимметрии электрической сети, а также определение значения погрешностей средств измерения, при котором не будет оказано влияние на определение коэффициента несимметрии.

Современные вычислительные устройства обрабатывают данные в цифровом виде [1]. Для определения и представления параметров сети в цифровом виде используются блоки вычислительной техники, состоящие из:

- датчика тока;
- датчика напряжения;
- преобразователя тока в напряжения;

– аналого-цифрового преобразователя напряжения.

Технические решения для измерения тока можно классифицировать на несколько видов [2]:

- токовый шунт;
- трансформатор тока;
- катушка Роговского;
- датчики на основе эффекта Холла разомкнутого и замкнутого контуров;
- сигма-дельта модулятор.

Датчики для измерения напряжения также можно классифицировать [3]:

- резисторный делитель и аналоговый усилитель без гальванической развязки;
- делитель и аналоговый усилитель с гальванической оптронной развязкой.

На рис. 1 показаны два датчика переменного напряжения и плата Arduino Uno на базе микроконтроллера Atmega328P. Датчик переменного напряжения, смонтированный на макетной плате, состоит из выпрямительного диода моста и резисторного делителя.

Под уровнем несимметрии понимается любой из используемых на практике относительных показателей, характеризующих несимметрию [4], например:

- коэффициенты несимметрии напряжений обратной (1) и нулевой (2) последовательностей, определяемые как отношение действующих значений напряжений этих симметричных составляющих к напряжению прямой последовательности [5]

¹ ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115349>.

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_1}, \quad (1)$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности; U_1 – напряжение прямой последовательности;

$$k_{0U} = \frac{U_0}{U_1}, \quad (2)$$

где U_0 – напряжение нулевой последовательности; суммарное относительное отклонение по мощности, определяемое как отношение суммы модулей разности фазного и среднего значения мощности к среднему значению мощности [6];

$$k = \frac{|S_A - S_{cp}| + |S_B - S_{cp}| + |S_C - S_{cp}|}{S_{cp}}, \quad (3)$$

где S_A – мощность фазы А; S_B – мощность фазы В; S_C – мощность фазы С; S_{cp} – средняя мощность трёх фаз:

$$S_{cp} = \frac{S_A + S_B + S_C}{3}; \quad (4)$$

– коэффициент неравномерности токов, определяемый как отношение суммы квадратов фазных токов к квадрату суммы фазных токов и т.п. [7].

$$k_{\text{неравн}} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2}, \quad (5)$$

где I_A , I_B , I_C – токи фаз А, В и С соответственно.

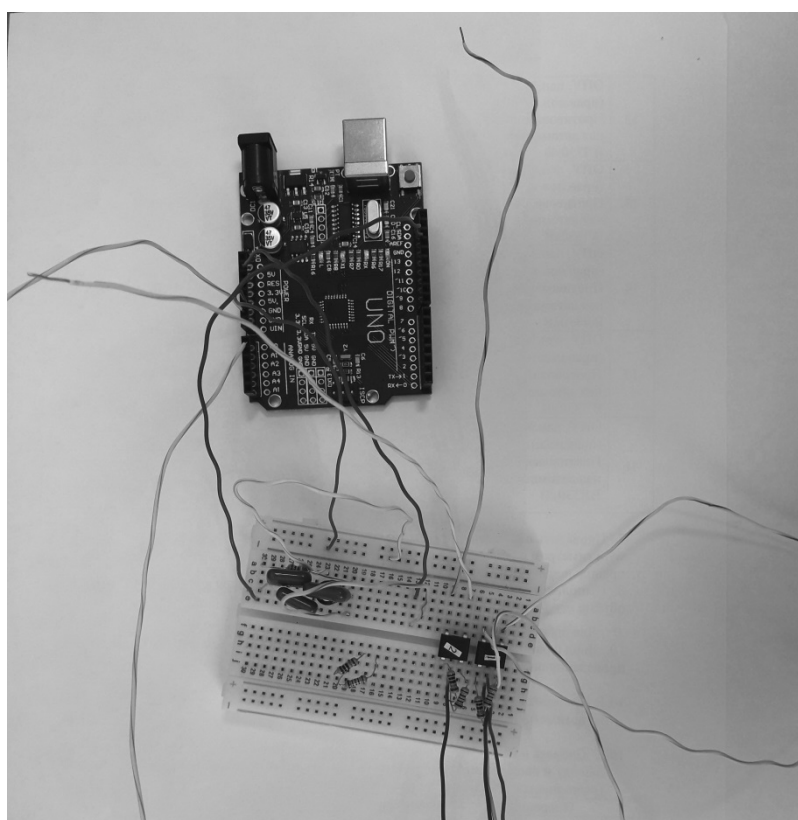


Рис.1. Плата Arduino Uno и датчики напряжения

Fig.1. Arduino Uno board and voltage sensors

Материалы и методы решения задачи

Для большинства коэффициентов несимметрии требуется, помимо значений токов и напряжений, определять ещё и угол сдвига фаз между током и напряжением. Реализация такого условия требует совместного использования датчика тока и напряжения для одной фазы. В трёхфазной сети применяется три датчика тока и три датчика напряжения [8].

Аналоговый сигнал с каждого из шести датчиков (рис. 2) преобразовывается в цифровой сигнал для дальнейшей обработки. Обработка мгновенных значений токов и напряжений заключается в определении действующих значений за период методом преобразования Фурье и нахождение угла сдвига фаз φ [10].

При симметрировании сети включением дополнительной мощности или

перераспределением существующей необходимо рассчитать режим изменённой сети. Для этого требуется знать электрическое сопротивление нагрузок и сопротивления проводов сети, которые составляют от сотых долей Ом для проводов линии до десятков и сотен Ом для нагрузок. Сопротивление определяется расчётным способом, имея в качестве входных величин токи и напряжения [10]. При этом падение напряжения на проводах линии составляет десятые доли вольт, в то время как измеряются фазные напряжения, равные 220 В. По этой причине важно выполнить измерение фазных величин с высокой точностью, чтобы затем при расчётах получить величины на два-три порядка меньше с достаточной точностью. Расчёты производятся микроконтроллером на базе Atmega328P (см. рис. 2) [11].

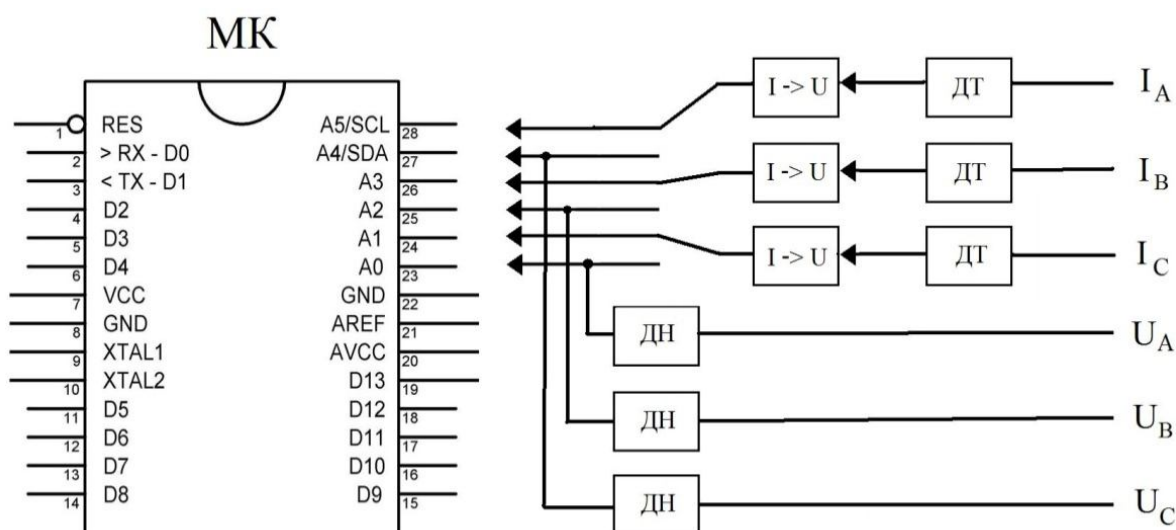


Рис.2. Измерения для аналого-цифрового преобразования на базе микроконтроллера Atmega328P

Fig.2. Measurements for analog-to-digital conversion based on Atmega328P microcontroller

Зависимость вероятности снижения несимметрии от величины такого снижения представлено на рисунке 3 по результатам исследования [3]. На графике изображен 21 отрезок, так как количество неповторяющихся вариантов снижений несимметрии $m_2=21$. Все остальные варианты на графике накладываются друг на друга, так как имеют идентичное снижение несимметрии.

Таким образом, каждой вероятности появления одного из вариантов ставится в соответствие достижимое снижение несимметрии. Полученная зависимость показывает, какова вероятность того, что в произвольной электрической сети с известным количеством присоединений n , суммарной мощностью

ΣP , будет возможным произвести снижение несимметрии на определённую величину.

Наибольшая вероятность снижения несимметрии – больше 0,002% для каждого варианта – наблюдается у 44016 вариантов, и при этом снижение несимметрии составит от 50% до 75% (см. рис. 3). Суммарная вероятность снижения несимметрии всех 44016-ти вариантов составит 62,78%.

Для рассмотрения вопроса ошибки при определении мощностей (напряжений и токов) следует проанализировать следующую зависимость. Аргументом является погрешность из ряда стандартных классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0.

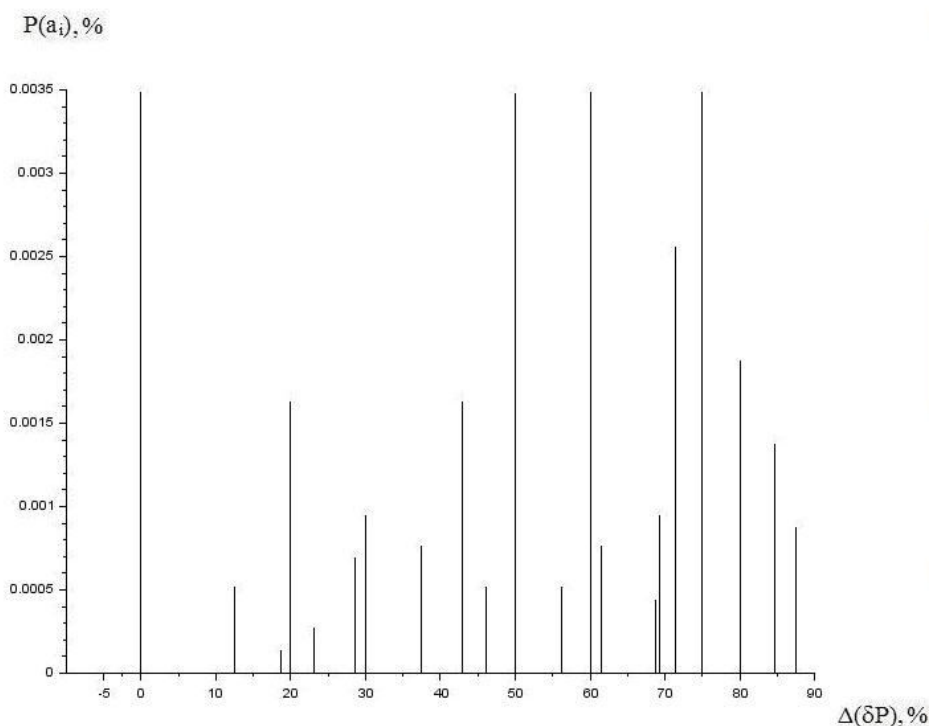


Рис.3. Зависимость вероятности снижения несимметрии от величины снижения в предлагаемом способе

Fig.3. The dependence of the probability of reducing asymmetry on the magnitude of the reduction in the proposed method

Для набора коэффициентов несимметрии до симметрирования $k_{\text{несим_до}}$ рассчитывается суммарный коэффициент с учётом их весов:

$$k_{\text{сумм_несим_до}} = k_{\text{несим_до_1}} \cdot W_1 + k_{\text{несим_до_2}} \cdot W_2 + \dots + k_{\text{несим_до_75582}} \cdot W_{75582}, \quad (6)$$

где W_1 – вес 1-го варианта, численно равный вероятности появления варианта №1; W_2 – вес 2-го варианта, численно равный вероятности появления варианта №2; W_{75582} – вес 75582-го варианта, численно равный вероятности появления варианта №75582 (причём, $W_1 + W_2 + \dots + W_{75582} = 1$); $k_{\text{несим_до_1}}$ – коэффициент несимметрии до симметрирования для варианта №1; $k_{\text{несим_до_2}}$ – коэффициент несимметрии до симметрирования для варианта №2; $k_{\text{несим_до_75582}}$ – коэффициент несимметрии до симметрирования для варианта №75582.

Аналогично рассчитываются суммарные коэффициенты для коэффициентов несимметрии без поправки на ошибку измерения $k_{\text{несим}}$ и с поправкой на ошибку измерений $k_{\text{несим_ош}}$:

$$k_{\text{сумм_несим}} = k_{\text{несим_1}} \cdot W_1 + k_{\text{несим_2}} \cdot W_2 + \dots + \dots + k_{\text{несим_75582}} \cdot W_{75582}, \quad (7)$$

где $k_{\text{несим_1}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования для варианта №1; $k_{\text{несим_2}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования для варианта №2; $k_{\text{несим_75582}}$ – коэффициент

несимметрии после симметрирования для варианта №75582.

$$k_{\text{сумм_несим_ош}} = k_{\text{несим_ош_1}} \cdot W_1 + \dots + k_{\text{несим_ош_2}} \cdot W_2 + \dots + k_{\text{несим_ош_75582}} \cdot W_{75582}, \quad (8)$$

где $k_{\text{несим_ош_1}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования с учётом ошибки измерения для варианта №1; $k_{\text{несим_ош_2}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования с учётом ошибки измерения для варианта №2; $k_{\text{несим_ош_75582}}$ – коэффициент несимметрии после симметрирования с учётом ошибки для варианта №75582.

Результаты и их обсуждение

Разность между суммарным коэффициентом до симметрирования и суммарным коэффициентом после симметрирования без учёта ошибки измерения $k_1 = k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим}}$ и разность между суммарным коэффициентом до симметрирования и суммарным коэффициентом после симметрирования с учётом ошибки измерения $k_2 = k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим_ош}}$ показывают величину снижения несимметрии без ошибки измерений и с ошибкой соответственно. Их отношение (9) покажет, во сколько раз изменится снижение несимметрии из-за влияния ошибки измерения по сравнению со снижением несимметрии без неё.

$$k_{12} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим}}}{k_{\text{сумм_несим_до}} - k_{\text{сумм_несим_ош}}}, \quad (9)$$

$$k_{12\%} = (k_{12} - 1) \cdot 100\%. \quad (10)$$

Коэффициент $k_{12\%}$, показывающий, на сколько процентов изменится снижение несимметрии из-за влияния ошибки (10), является функцией.

Предполагается, что при расчёте мощности приведённая погрешность максимальна. Например, при погрешности $\delta_U = \pm 0,2\%$ для напряжения и $\delta_I = \pm 0,2\%$ для тока величина мощности с учётом погрешности составит максимальную величину $P_{\text{ош}}$

$$P_{\text{ош}} = (1 + \max(\delta_U)) \cdot (1 + \max(\delta_I)) \cdot P = 1,004004 \cdot P, \quad (11)$$

где P – истинное значение мощности.

Коэффициент несимметрии в виде среднего отклонения по мощности – есть функция, аргументами которой являются мощности фаз А, В, С. Предполагается, что погрешность оказывает максимальное влияние и на коэффициент несимметрии. Для этого погрешность в определении мощности наиболее нагруженной фазы должна иметь максимальное значение, погрешность в определении мощности остальных двух фаз должны быть равны нулю. Зависимость $k_{12\%}(\delta)$ представлена ниже.

Зависимость коэффициента $k_{12\%}$ от инструментальной погрешности

The dependence of $k_{12\%}$ coefficient on the instrumental error

$\delta, \%$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0	6,0
$k_{12\%}$	0	0	0	0	0	0	37,79	37,79	37,79	5521,54

Выводы. Таким образом, рассмотрены основные особенности применения датчиков тока и напряжения при определении коэффициента несимметрии электрической сети. Важным вопросом является инструментальная точ-

ность датчиков тока и напряжения. Установлено, что при погрешностях средств измерения тока и напряжения $\delta \leq 1\%$ влияние на определение коэффициента несимметрии не оказывается.

Список литературы

1. Чекмарев А. Датчики тока и напряжения АВВ – от печатной платы до преобразователей-гигантов // Силовая электроника. 2006. №3. С.56-57.
2. Индустриальные датчики тока и напряжения. URL: http://infiber.ru/products/optoisolation/plastic_optocouplers/isolation_amplifiers.html (дата обращения: 06.06.2019).
3. Закурдаев Р.Ю., Чернецкая И.Е. Математическое обоснование снижения несимметрии в сети электроснабжения вычислительной техники // Телекоммуникации. 2019. №2. С. 35-42.
4. Закурдаев Р.Ю., Чернецкая И.Е. Обзор существующего инструментария для снижения несимметрии и анализ его соответствия современному и перспективному

уровню информатизации коммунально-бытовых электрических сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. №5(74). С. 16-24.

5. Реймов К.М., Хасанов М.Ю. Способ уменьшения несимметрии в трехфазных электрических сетях // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. 2016. №14. С. 203-210.

6. Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е. Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. 2015. №4 (47). С. 35-42.

7. Андреева З.А., Венедиктов С.В., Богомолов А.А., Державин А.С. Технические потери от перекоса фаз и меры по их снижению // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2014. №7. С. 32-37.

8. Егоров М.Ю., Самарин Г.Н. Аспекты внедрения и разработки устройства симметрирования напряжений // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 2(17). С. 188-194.

9. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Алгоритмы управления трехфазным устройством выравнивания нагрузки электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 162-172.

10. Андреева З.А., Венедиктов С.В., Богомолов А.А., Державин А.С. Технические потери от перекоса фаз и меры по их снижению // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2014. №7. С. 32-37.

11. Черкашина Г.И. Симметрирование режимов работы системы электроснабжения бытового сектора // Энергосбережение, энергетика, аудит. 2015. №4. С. 21-28.

Reference

1. Chekmarev A. Datchiki toka i napryazheniya ABB – ot pechatnoy platy do preobrazovateley-gigantov [ABB Current and Voltage Sensors - From PCBs to Gigantic Converters]. *Silovaya elektronika = Power electronics*, 2006. no.3, pp. 56-57 (In Russ.).

2. Industrial'nyye datchiki toka i napryazheniya [Industrial current and voltage sensors]. Available at: http://infiber.ru/products/optoisolation/plastic_optocouplers/isolation_amplifiers.html (accessed: 06.06.2019) (In Russ.).

3. Zakurdayev R.YU., Chernetskaya I.Ye. Matematicheskoye obosnovaniye snizheniya nesimmetrii v seti elektrosnabzheniya vychislitel'noy tekhniki [The mathematical justification for reducing asymmetries in the power supply network of computer technology]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2019, no. 2, pp. 35-42 (In Russ.).

4. Zakurdayev R.YU., Chernetskaya I.Ye. Obzor sushchestvuyushchego instrumentariya dlya snizheniya nesimmetrii i analiz yego sootvetstviya sovremennomu i perspektivnomu уровню informatizatsii kommunal'no-bytovykh elektricheskikh setey [Review of existing tools for reducing asymmetry and analysis of its compliance with the current and future level of informatization of household electrical networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, no.5(74), pp. 16-24 (In Russ.).

5. Reymov K.M., Khasanov M.YU. Sposob umen'sheniya nesimmetrii v trekhfaznykh elektricheskikh setyakh [A method of reducing asymmetry in three-phase electrical net-

works]. *Infrastrukturnyye otrasli ekonomiki: problemy i perspektivy razvitiya* = *Infrastructure sectors of the economy: problems and development prospects*, 2016, no.14, pp. 203-210 (In Russ.).

6. Dulepov D.Ye., Tyundina T.Ye. Raschet nesimmetrii napryazheniy SES [Calculation of voltage unbalance in power supply systems]. *Vestnik NGIEI* = *Herald NGIEI*, 2015, no.4 (47), pp. 35-42 (In Russ.).

7. Andreyeva Z.A., Venediktov S.V., Bogomolov A.A., Derzhavin A.S. Tekhnicheskiye poteri ot perekosa faz i mery po ikh snizheniyu [Technical losses from phase imbalance and measures to reduce them]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy i puti ikh resheniya* = *Modern science: current problems and solutions*, 2014, no.7, pp. 32-37 (In Russ.).

8. Yegorov M.YU., Samarin G.N. Aspekty vnedreniya i razrabotki ustroystva simmetrirovaniya napryazheniy [Aspects of implementation and development of a voltage balancing device]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* = *Agriculture Innovation*, 2016, no. 2(17), pp. 188-194 (In Russ.).

9. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'yev A.A. Algoritmy upravleniya trekhfaznym ustroystvom vyravnivaniya nagruzki elektricheskoy seti [Algorithms for controlling a three-phase load balancer]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* = *Bulletin of the Chuvash University*, 2017, no. 1, pp. 162-172 (In Russ.).

10. Andreyeva Z.A., Venediktov S.V., Bogomolov A.A., Derzhavin A.S. Tekhnicheskie poteri ot perekosa faz i mery po ikh snizheniyu [Technical losses from phase imbalance and measures to reduce them]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy i puti ikh resheniya* = *Modern science: current problems and solutions*, 2014, no.7, pp. 32-37 (In Russ.).

11. Cherkashina G.I. Simmetrirovaniye rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya bytovogo sektora [Balancing the operating modes of the household electricity] *Energosbere-zheniye, energetika, audit* = *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2015, no.4, pp. 21-28 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Роман Юрьевич Закурдаев, аспирант, кафедра вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: romanzakurdaev@yandex.ru

Roman Yu. Zakurdaev, Post-Graduate Student, Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: romanzakurdaev@yandex.ru

Ирина Евгеньевна Чернецкая, доктор технических наук, профессор, кафедра вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: white731@yandex.ru

Irina E. Chernetskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: white731@yandex.ru