

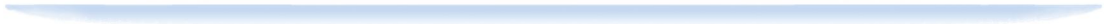
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 24 № 1 / 2020



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 24 № 1 / 2020



**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.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, Институт машиноведения Российской академии наук (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, 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).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

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

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2020



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: один раз в квартал

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 21.02.2020. Формат 60х84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 24,9.
Тираж 1000 экз. Заказ 8.

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

Mechanical engineering and machine science: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Computer science, computer engineering and control: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

Thomas Bock, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Shah R., Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

Founder and Publisher:
"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(ПИ №ФС77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str. 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 41219

in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2020



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

Singed to print 21.02.2020. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 24,9.

Circulation 1000 copies. Order 8.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания 8**
Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Чернышов М. О.
- Моделирование и исследование стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей при обработке протяженных РК-профильных валов 23**
Куц В. В., Пономарев В. В.
- Повышение эффективности зубофрезерования путем создания сборных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами 35**
Артамонов Е. В., Киреев В. В., Зырянов В. А.
- Разработка технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования 52**
Кузовкин А. В., Суворов А. П., Крохин Д. Е., Куц В. В.
- Исследование работы расширенного фильтра Калмана, дополненного адаптивным цифровым фильтром, для комплексирования данных системы управления мобильным роботом..... 68**
Безмен П.А.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

- Реализация механизмов контактно-конденсационной теории твердения при формировании строительных композитов 90**
Степанова М.П., Сотникова О.А.
- Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой 103**
Ветрова О.А.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора.....115**
Бобырь М.В., Милостная Н.А., Булатников В.А., Лунева М.Ю.
- Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов морских судов130**
Конарев Д. И., Гуламов А. А.
- Алгоритм сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска дефектов144**
Еремеев С. В., Романов С. А.
- Применение нейронных сетей в задаче количественного анализа состава воздушной среды.....159**
Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Чернышов Р.Е.
- Восстановление порядка следования информационных пакетов на основе анализа хеш-последовательностей175**
Таныгин М.О.
- Повышение эффективности измерений концентрации горючих газов термокаталитическим датчиком189**
Бондарь О.Г., Брежнева Е.О.
- Способ реализации адаптации робота к изменениям режима контактного взаимодействия с использованием глубоких полносвязных нейронных сетей.....206**
Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Салихзянов А.М., Заляев Э.М.

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Chip Breaking During Automated Processing by Cutting Hard-to-Work Steels by Integrated Use of Chip Breaking Tools and High-Temperature Embrittlement	8
<i>Artamonov E. V., Vasil'yev D. V., Chernyshov M. O.</i>	
Modeling and Research of Resistance Characteristics of an Interlocking Side Milling Cutter with a Constructive Radial Feed When Processing Extended RK-profile Shafts	23
<i>Kuts V. V., Ponomaryov V. V.</i>	
Improving Gear Milling Efficiency by Creating Prefabricated Cutters with Replaceable Cutting Carbide Plates	35
<i>Artamonov E. V., Kireev V. V., Zyryanov V. A.</i>	
Development of the Technology for Manufacturing a Combination EDM Electrode by Rapid Prototyping	52
<i>Kuzovkin A. V., Suvorov A. P., Krokhin D. Y., Kuts V. V.</i>	
Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System	68
<i>Bezmen P. A.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Implementation of Contact-Condensation Hardening Theory Mechanisms When Forming Building Composites	90
<i>Stepanova M. P., Sotnikova O. A.</i>	
Pilot Studies of concrete Beams Deformability Reinforced with Composite Reinforcement.....	103
<i>Vetrova O. A.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator	115
<i>Bobyry M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A., Luneva M. Yu.</i>	
Synthesis of Neural Network Architecture for Recognition of Sea-Going Ship Images.....	130
<i>Konarev D. I., Gulamov A. A.</i>	
An Algorithm of Image Segmentation Based on Persistent Homology for Solving Defects Searching Problems	144
<i>Eremeev S. V., Romanov S. A.</i>	
Application of Neural Networks in the Problem of Quantitative Analysis of Air Composition.....	159
<i>Bondar O. G., Brezhnev E. O., Chernyshov R. E.</i>	
Restoring the Order of Information Packets Based on Hash Sequence Analysis.....	175
<i>Tanygin M. O.</i>	
Improving the Efficiency of Measurements of Combustible Gases Concentration by a Thermocatalytic Sensor	189
<i>Bondar O. G., Brezhnev E. O.</i>	
Implementation Method of the Robot Adaptation to Contact Interaction Mode Changes Using Deep Fully Connected Neural Networks	206
<i>Savin S. I., Vorochaeva L. Yu., A Malchikov. V., Salikhzyanov A.M., Zalyaev E.M.</i>	

Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания

Е. В. Артамонов¹, Д. В. Васильев¹✉, М. О. Чернышов¹

¹ ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
ул. Володарского 38, г. Тюмень 625000, Российская Федерация

✉ e-mail: vasilevdy@tyuiu.ru

Резюме

Цель исследования заключается в повышении производительности при резании труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающей геометрии инструмента и режимов резания, обеспечивающих понижение вязких свойств стружки, обрабатываемого материала. В статье рассматриваются проблемы механической обработки деталей нефтедобывающего оборудования на предприятиях Западной Сибири. Представлено основное и главное условие обеспечения дробления стружки. Выявлена проблема малой эффективности существующих в современной промышленности способов, в той или иной мере направляющих, завивающих и стружкодробящих методов.

Методы. Проведено имитационное моделирование, расчет направления и дробления стружки; определены эффективные способы решения проблемы дробления стружки при механической обработке деталей из материалов, обладающих коррозионностойкими, жаропрочными свойствами; проведены лабораторные, стойкостные испытания комплексного метода.

Результаты изучения механизма стружкообразования при обработке резанием жаропрочных и коррозионностойких сплавов. Для решения проблемы в статье сформулированы две задачи, которые были решены с помощью информации, взятой из теории сопротивления материалов, диаграмм растяжения при испытании образцов из коррозионностойких, жаропрочных материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Разработана и представлена стружколомающая сменная режущая пластина с переменным передним углом. Представлены результаты и анализ данных лабораторных испытаний, в которых применялась пластина со стружколомающей геометрией передней поверхности, показаны режимные условия эффективного стружколомания. Сформулированы выводы по решению первой задачи, показано, что определяющим фактором при стружкодроблении являются физико-механические характеристики обрабатываемого материала, которые изменяются при различных режимах резания.

Закключение. В работе показано, что отвод стружки из зоны резания предотвращает попадание её в область режущей кромки, снижая ударные нагрузки на неё, повышая качество механической обработки.

Установлена возможность формирования в стружке концентраторов напряжения, приводящих к саморазрушению стружки даже при обработке вязких жаропрочных сплавов. Используется гипотеза о том, что температурные условия максимальной обрабатываемости жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов соответствуют условиям высокотемпературного охрупчивания, с помощью которого можно создать условия эффективного дробления стружки и условия максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов.

Ключевые слова: стружкообразование; скорость резания; обрабатываемость; высокотемпературное охрупчивание; концентратор напряжения; направление схода стружки; передняя поверхность.

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

Для цитирования: Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Чернышов М. О. Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020; 24(1): 8-22. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-8-22>.

Поступила в редакцию 25.11.2019

Подписана в печать 21.12.2019

Опубликована 21.02.2020

Chip Breaking During Automated Processing by Cutting Hard-to-Work Steels by Integrated Use of Chip Breaking Tools and High-Temperature Embrittlement

Evgeny V. Artamonov ¹, Dmitriy V. Vasil'yev ¹ ✉, Mikhail O. Chernyshov ¹

¹ Industrial University of Tyumen
38 Volodarskogo str., Tyumen 625000, Russian Federation

✉ e-mail: vasilevdy@tyuiu.ru

Abstract

Purpose of research is to increase productivity when cutting hard-to-work steels by integrated use of chip breaking tool geometry and cutting modes, which reduce the viscous properties of the chips and the processed material. The article discusses the problems of mechanical processing of parts of oil production equipment at enterprises in Western Siberia. It is presented the main condition for ensuring chip crushing and revealed the problem of low efficiency of existing methods in modern industry, to one degree or another guiding, curling and chip-cutting method.

Methods. Simulation modeling, calculation of chip direction and crushing were performed; effective methods for solving the problem of chip crushing during the machining of parts made of materials with corrosion-resistant, heat-resistant properties were identified; laboratory, persistent tests of the complex method were carried out.

Results of studying the mechanism of chip formation during processing by cutting heat-resistant and corrosion-resistant alloys are given here. To solve the problem, we have formulated two tasks that were solved using information taken from the theory of material resistance, tensile diagrams when testing samples of corrosion-resistant, heat-resistant materials with high operational properties. A chip breaking exchangeable insert with a variable rake angle is designed and presented. The results and analysis of laboratory test data, in which a plate with chip breaking geometry of the front surface is used, are presented, the operating conditions of effective chip breaking are shown. The conclusions on the solution of the first problem are formulated, it is shown that the determining factor in chip breaking is the physical and mechanical characteristics of the processed material, which vary with different cutting conditions.

Conclusion. The work shows that chip removal from the cutting zone prevents it from entering the cutting edge area, reducing impact loads on it and improving the quality of machining. It is possible to form stress concentrators in the

chips, leading to chip self-destruction even when processing viscous heat-resistant alloys. The hypothesis is used that the temperature conditions for the maximum workability of heat-resistant and corrosion-resistant steels and alloys correspond to the conditions of high-temperature embrittlement, with the help of which it is possible to create conditions for effective chip crushing and conditions for maximum workability when cutting heat-resistant steels and alloys.

Keywords: chip formation; cutting speed; workability; high-temperature embrittlement; stress concentrator; chip exit direction; front surface.

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

For citation: Artamonov E.V., Vasil'yev D. V., Chernyshov M.O. Chip Breaking During Automated Processing by Cutting Hard-to-Work Steels by Integrated Use of Chip Breaking Tools and High-Temperature Embrittlement. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 8-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-8-22>.

Received 25.11.2019

Accepted 21.12.2019

Published 21.02.2020

Введение

При производстве и ремонте нефтедобывающего оборудования на предприятиях Западной Сибири основной проблемой является механическая обработка резанием деталей из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами [1, 2], на станках с числовым программным управлением особой проблемой является образуемая стружка снижающая качество обрабатываемой поверхности при резании металлов, попадающая на главную и вспомогательную режущие кромки при резании в виде стальной ленты, нагретой до высоких температур и движущейся с большой скоростью, представленной на рис. 1.

Для обеспечения дробления стружки необходимо взаимодействие ее с различными препятствиями: различные поверхности инструмента, поверхности детали [3, 4, 5] и другие способы, представленные на рис. 2 [6, 7, 8, 9, 10, 11].



Рис. 1. Стружка сливная без завитков

Fig. 1. Chip without curls

Такие способы так или иначе направляют, завивают и становятся упорами для стружки, однако при обработке резанием фасонных поверхностей происходит изменение направления угла схода стружки поэтому присутствие на передней поверхности стружколомов малоэффективно. Также существуют такие жаропрочные стали и сплавы, при обработке которых образуемая стружка не поддается дроблению. Такие сплавы имеют высокие вязкие свойства и для

обеспечения стабильного и эффективного дробления стружки из этих материалов недостаточно применять специальные поверхности передней грани резцов, накладные стружколомы, стружколомные упоры и другие устройства для ломания стружки [12, 13].

Цель исследования заключается в повышении производительности при резании труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающей геометрии инструмента и режимов резания, обеспечивающих понижение вязких свойств стружки, обрабатываемого материала.

Для решения данной цели сформулированы следующие задачи:

- Создать такую переднюю поверхность токарного резца, геометрия которого обеспечивает устойчивое стружкодробление, точность обработки детали и уменьшение шероховатости обработанной поверхности.
- Разработать методику определения режимов резания, обеспечивающих снижение вязких свойств стружки, условия максимальной обрабатываемости, обрабатываемых деталей из легированных сталей и жаропрочных сплавов.

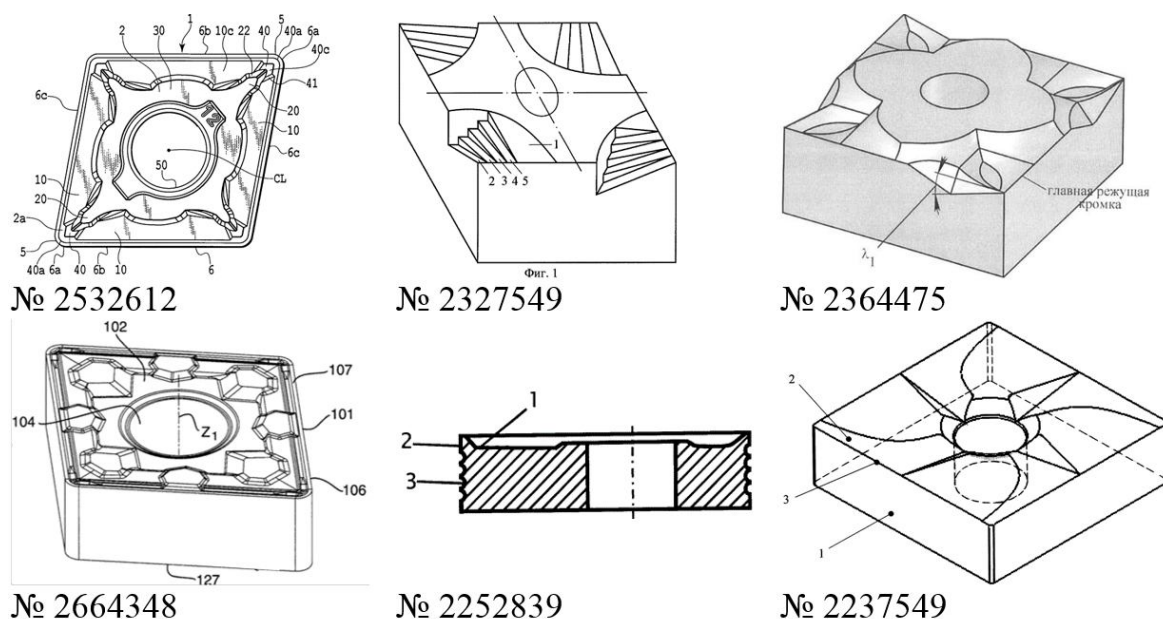


Рис. 2. Стружколомающие сменные режущие пластины

Fig. 2. Chipbreaking replaceable cutting plates

Материалы и методы

В поисках решений и методов для создания стружколомающей передней поверхности токарного резца авторами были исследованы способы снижения прочностных и пластических свойств

коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов.

В теории сопротивления материалов отмечено, что важной причиной снижения деформационной способности, на 90% и более, может быть присутствие в испытываемых образцах концен-

траторов неравномерности напряженного состояния, как показано на рис. 3. Диаграммы испытаний свидетельствуют о

том, что наиболее эффективно стружка должна дробиться в присутствии в ней концентраторов напряжения [14, 15].

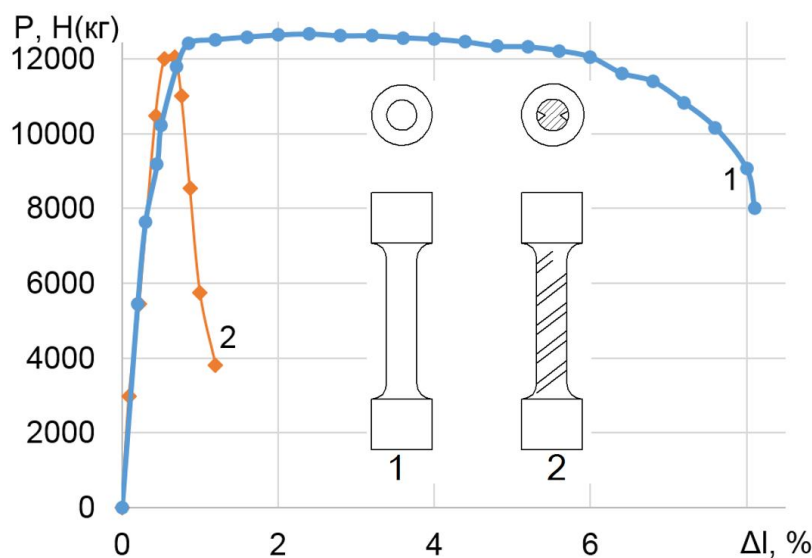


Рис. 3. Диаграмма растяжения, при испытании образцов из стали ХН35ВТ:
1 - гладкий образец; 2 - образец с концентраторами напряжения

Fig. 3. Tensile diagram, when testing samples of steel XH35BT:
1 - smooth sample; 2 - sample with stress concentrators

Результаты и их обсуждение

В результате анализа информации стало известно, что концентраторы на поверхности стружки можно создать с помощью управления углом отклонения стружки (рис. 4), перепада коэффициента усадки стружки и деформации в поперечном сечении.

Спроектированная авторами стружколомающая пластина, представленная на рис. 5, состоит из стружкозавивающей канавки, которая формируется плоской поверхностью 1 с неизменным положительным главным передним углом γ_1 и вспомогательным передним углом γ_2 , конусовидной поверхности 2, переходящую в вертикальную плос-

кость 8 и переднюю поверхность 3, изготовленную под отрицательным главным передним углом γ_3 и положительным вспомогательным передним углом γ_3' , образующую с плоской поверхностью стружкозавивающей канавки 1 единую главную режущую кромку 5, на которой под углом γ_f изготовлена фаска 6. Пластина имеет боковые грани 4 и 10, выполненные с задним углом пластины. Вертикальная плоскость 8 со стружкоделительной кромкой 7 находится относительно главной режущей кромки 5 под углом ν , на расстоянии рабочего участка – С от вершины режущей части пластины с радиусом при вершине r.

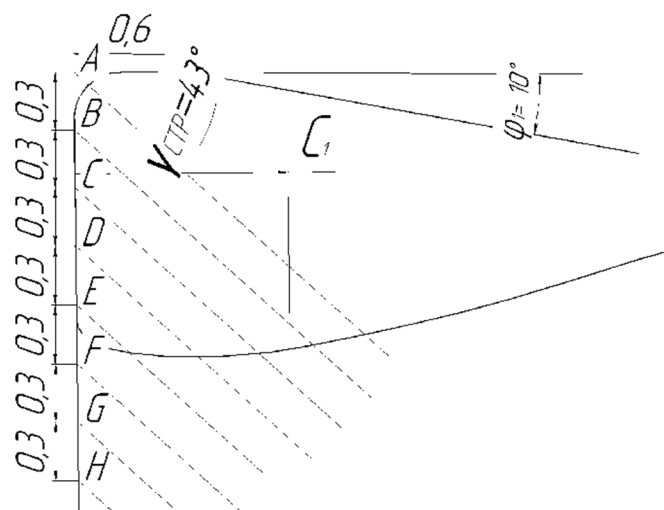


Рис. 4. Схема определения направления схода стружки на передней поверхности пластины (вид в плане)

Fig. 4. Scheme for determining the direction of chip flow on the front surface of the plate (plan view)

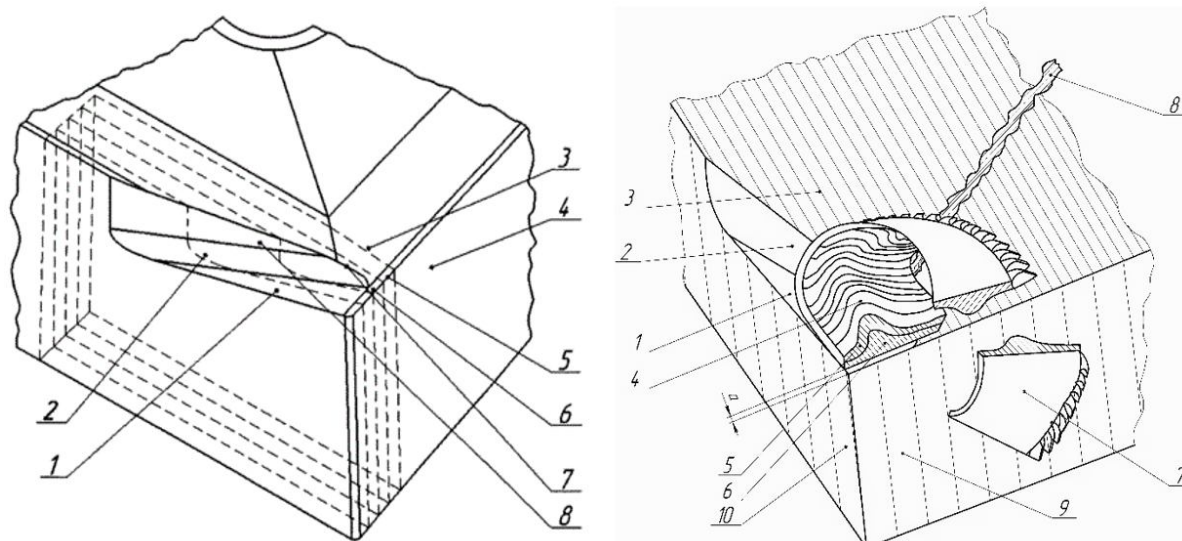


Рис. 5. Стружколомающая сменная режущая пластина с переменным передним углом

Fig. 5. Chip breaking replaceable insert with variable rake angle

Такая геометрия передней поверхности токарного резца не имеет выступов, которые создают опасные напряжения на режущей кромке. А плавные переходы стружколомающих поверхностей позволяют выдерживать нагрузки, образуемые при черновой обработке точением.

При условии, когда $2/3$ ширины поперечного сечения стружки образуются при положительной геометрии, а остальная $1/3$ – при отрицательной геометрии, стружка будет иметь разный коэффициент усадки поперечного сечения, **определение (1)**, что неизбежно приведет к образованию концентрато-

ров напряжения на 1/3 части стружки, как показано на рис. 4 [16].

$$K = \sqrt{1 + \frac{L_n}{S} - \cos \gamma}, \quad (1)$$

где S – продольная подача, мм/об.;

L_n – длина контакта стружки с плоской поверхностью 1 в сечении п.

Лабораторные испытания с использованием данной пластины показали, что эффективное стружколомание обеспечивается при высоких скоростях резания и больших подачах, и малоэффективное стружколомание при средних скоростях резания и малых подачах (табл. 1).

Таблица 1. Виды стружки, полученные при точении стали 30ХГСА, резцом из твердого сплава ВК8 со стружколомающей геометрией

Table 1. The types of chips obtained by turning steel 30HGSA with a VK8 hard alloy cutter with chip breaking geometry

Сливная стружка	Суставчатая стружка	Элементная стружка
		
59 м/мин; $S=0,23$ мм/об	94 м/мин; $S=0,34$ мм/об	94м/мин; $S=0,43$ мм/об

Анализ табл. 1 показал, что определяющим фактором при стружкодроблении является не геометрия, а физико-механические характеристики обрабатываемого материала, которые изменяются при различных режимах резания [17].

В поисках решения второй задачи был проведён анализ справочных данных зависимостей механических характеристик от температуры жаропрочных сталей, изображенных на рис. 6.

Анализ показал, что эти стали и сплавы подвержены высокотемпературному охрупчиванию [17], приводя-

щему к минимальным значениям составляющей силы резания P_z , затрачиваемой мощности на процесс резания, минимальным износом режущего инструмента. Такие значения ведут к повышению обрабатываемости материалов, изменению вида стружки из сливной в элементную, уменьшению коэффициента сплошности стружки k_s .

Таким физическим явлением как высокотемпературное охрупчивание можно пользоваться при создании условий дробления стружки.

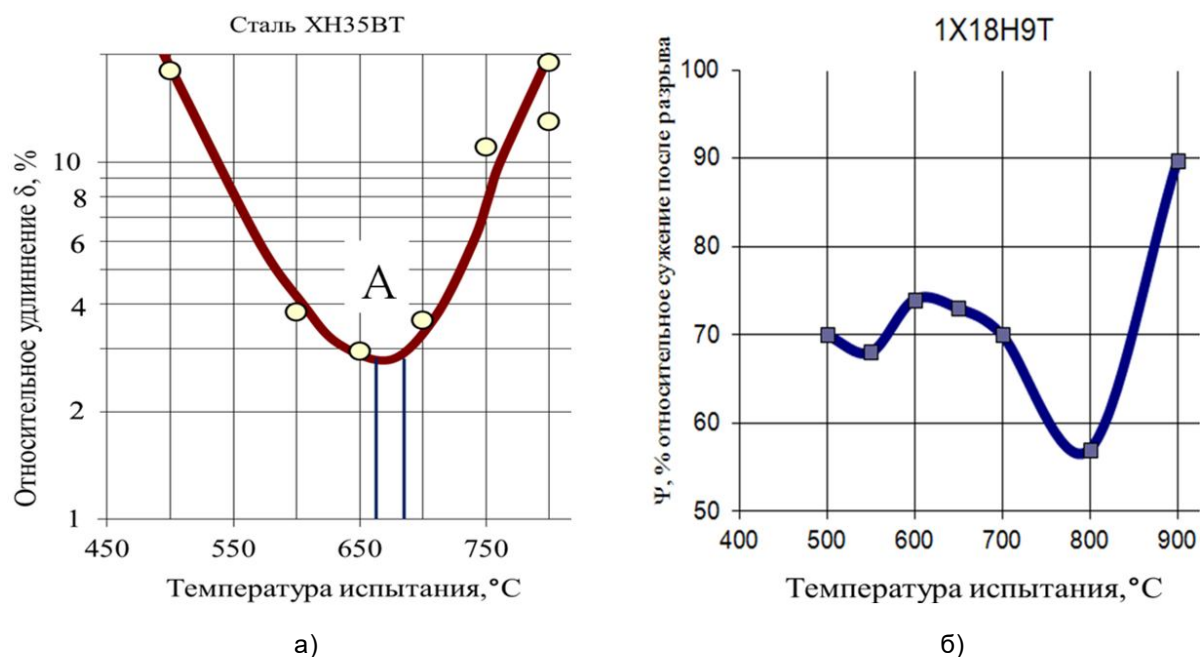


Рис. 6. Зависимость механических характеристик сталей от температуры

Fig. 6. The dependence of the mechanical characteristics of steels on temperature

По рис. 6,а видно, что максимальный эффект охрупчивания для сплава ХН35ВТ имеет место при определённой температуре, равной 650 - 700 °С. Этот температурный диапазон и необходимо создавать в процессе резания.

Для доказательства данного предположения в лаборатории резания металлов ТИУ, ИПТИ, кафедры «СИ» были проведены стойкостные испытания при черновой обработке стали 05Х16Н4Д2Б, результаты которых показали явную зависимость вида стружки от температурно-скоростного фактора (табл. 2).

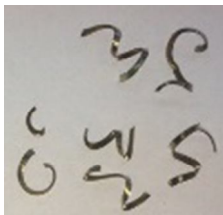
Кратковременные стандартные испытания при резании показали влияние температурно-скоростного фактора на вид стружки, то есть с повышением скорости и температуры резания происходит переход от одного вида стружки к другому: при невысоких температурах

резания (до 500° - 600°С) элементная стружка с такими характеристиками, как шаг элементов – m , толщина элемента – b_1 , высота сплошного участка стружки – a_2 , толщина или высота элемента стружки – a_1 , угол наклона плоскости сдвига (скола) элемента – ϕ_K , переходит в сливную, характеризующуюся углом наклона условной плоскости сдвига – ϕ_K и коэффициентом усадки стружки ξ , с дальнейшим повышением температуры ($\approx 750^\circ$ - 800° С) происходит обратный переход сливной в элементную стружку [17], как показано в табл. 2.

Результаты эксперимента подтвердили диаграмму, предложенную профессором Полетикой М.Ф. [18], и показали хорошую взаимосвязь с результатами экспериментов работ [19, 14, 20].

Таблица 2. Вид стружек при обработке стали 05X16H4Д2Б, резцом из твердого сплава
 BK8 $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $S=0,43$ мм/об

Table 2. Type of chips during processing of steel 05X16H4D2B, VK8 solid carbide cutter
 $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $S = 0,43$ mm / rev

	
$v = 11$ м/мин, $\theta < 550^\circ$, Сливная	$v = 22$ м/мин, $\theta = 550^\circ$, Сливная
	
$v = 43,5$ м/мин, $\theta = 780^\circ$, Суставчатая	$v = 55$ м/мин, $\theta = 850^\circ$, Суставчатая
	
$v = 63$ м/мин, $\theta = 900^\circ$, Элементная	$v = 90$ м/мин, $\theta = 955^\circ$, Элементная

Однако предлагаемое физическое явление высокотемпературного охрупчивания, определяемое по зависимости вида стружки от температурно-скоростного фактора, визуально можно зафиксировать не на всех обрабатываемых сталях и сплавах. В этих случаях автором предлагается применять метод определения снижения вязких свойств стружки по коэффициенту сплошности стружки k_s .

Пользуясь разработанным методом определения коэффициента сплошности стружки k_s (2), можно определить отно-

шение максимальной площади поперечного сечения стружки к площади сплошного слоя стружки в этом сечении:

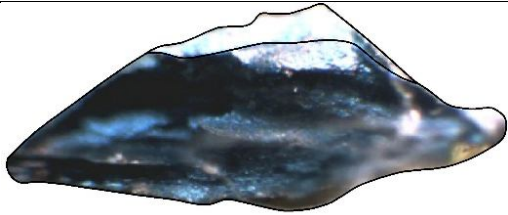
$$k_s = \frac{S_2}{S_1}, \quad (2)$$

где S_1 – максимальная площадь поперечного сечения стружки;

S_2 – площадь сплошного слоя стружки, как правило, сплошной слой стружки обуславливается четкой зернистостью (фасетками) в отличие от остальной сглаженной поверхности, как представлено в табл. 3 [15].

Таблица 3. Фрактограммы разрушения стружки в зависимости от скорости резания стали 05X16H4D2B

Table 3. Chip fracture patterns depending on the cutting speed of 05X16H4D2B steel

	
$v = 11 \text{ м/мин, Сливная, } k=0,91$	$v = 22 \text{ м/мин, Сливная, } k=0,72$
	
$v = 43,5 \text{ м/мин, Суставчатая, } k= 0,54$	$v = 55 \text{ м/мин, Суставчатая, } k=0,65$
	
$v = 63 \text{ м/мин, Элементная, } k=0,5$	$v = 90 \text{ м/мин, Элементная, } k=0,26$

Используя результаты научной работы, сформулированной и доказанной гипотезы [15], а также защищенную патентом методику «Формирования условий максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов твердосплавным инструментом» [20], можно определить режимы резания, при которых параметры P_z, ξ, h_{onz} принимают минимальные значения, как показано на рис. 7.

Эти закономерности указывают на температурно-скоростной диапазон, в котором обрабатываемый материал имеет минимальные эксплуатационные характеристики, а значит в этом температурном диапазоне разрушать, дробить стружку будет значительно легче.

Выводы

1. Эффективный стружкоотвод из зоны резания по стружкозавивающей канавке в сторону главной задней поверхности, не участвующей в процессе резания, исключает вероятность попадания её в область режущей кромки, снижая ударные нагрузки на неё, повышая качество токарной обработки.

2. Разделение ширины срезаемого слоя формирует на левом краю стружки концентраторы напряжения, которые приводят к саморазрушению стружки о главную заднюю поверхность инструмента даже при обработке вязких жаропрочных сплавов.

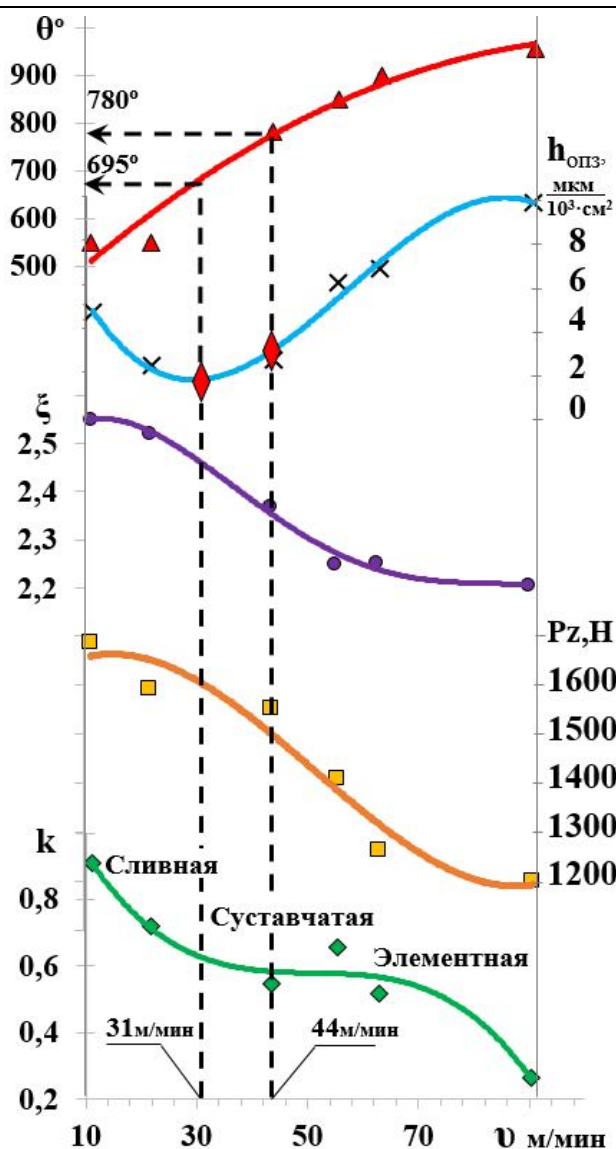


Рис. 7. Зависимости температуры резания θ °С, относительного износа по задней поверхности $h_{\text{опз}}$ (мм), коэффициента усадки стружки ξ , силы резания P_z , коэффициента сплошности стружки k_s от скорости резания V (м/мин) при обработке стали 05X16H4D2B

Fig. 7. Dependences of the cutting temperature θ °С, relative wear on the rear surface $h_{\text{опз}}$ (mm), shrinkage coefficient ξ , cutting force P_z , chip continuity coefficient k_s on cutting speed V (m / min) when machining steel 05X16H4D2B

3. Применяя такое физическое явление, как высокотемпературное охрупчивание, решается задача дробления стружки жаропрочных материалов, при обработке резанием.

4. Комбинируя данную геометрию передней поверхности стружколомающей пластины с физическим явлением высокотемпературного охрупчивания получа-

ем возможность снизить высокую температуру резания, негативно действующую на работоспособность твердосплавного режущего инструмента.

5. Используя физическое явление высокотемпературного охрупчивания можно создать условия максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов.

Список литературы

1. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
2. Силин С.С. Метод подобию при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
3. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2011. 368 с.
4. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высш. школа, 1974. 587 с.
5. Влияние скорости резания на стружкообразование при точении жаропрочных сплавов на основе хрома и никеля / А.М. Адаскин, В.Н. Бутрим, А.А. Верещака, А.С. Верещака, В.В. Каширцев // СТИН. 2014. № 10. С. 23-27.
6. Пат. РФ № 2664348 Российская Федерация, МПК В23В 27/22. Пластина для токарной обработки резанием и токарный инструмент / Селин Эрик, Хегбоуеген Леф, Ронни Элгстиген; заявитель и патентообладатель Сандвик Интеллекчуал Проперти АБ (SE). № 2014126091; заявл. 26.06.2014; опубл. 16.08.2018, Бюл.№23.
7. Пат. РФ № 2237549 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Сменная режущая пластина / Михайлов С.В., Скворцов Д.С.; заявитель и патентообладатель «Костромской государственный технологический университет» (RU). № 2003105381/02; заявл. 25.02.2003; опубл. 10.10.2004, Бюл.№28.
8. Пат. РФ № 2252839 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Режущая пластина / Васин С.А., Васин Л.А., Иванов В.В., Лавит И.М., Хлудов С.Я., Денисов Е.П., Денисов И.Е. ; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет (ТулГУ) (RU). № 2003130758/02; заявл. 20.10.2003; опубл. 27.05.2005, Бюл.№ 15.
9. Пат. РФ № 2532612 Российская Федерация, МПК В23В 27/22. Режущая пластина / Мадзима Синия; заявитель и патентообладатель Тунгалоу Корпорейшн (JP). № 2012147794/02; заявл. 06.05.2011; опубл. 10.11.2014, Бюл.№ 31.
10. Пат. РФ № 2364475 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Сменная режущая пластина / Михайлов С. В., Олейник А. П.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Костромской государственный технологический университет" (RU). № 2008112516/02, заявл. 31.03.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл.№ 23.
11. Пат. РФ № 2327549 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Режущая многогранная сменная пластина / Матвеев В. С., Баннов К. В., Градобоев А. В., Копнова Р. Д., Нестеренко В. П.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» (RU). № 2006134134/02; заявл. 25.09.2006; опубл. 27.06.2008, Бюл.№ 18.

12. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
13. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 448 с.
14. Работоспособность инструментов и физико-механические характеристики инструментальных твердых сплавов и обрабатываемых материалов / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, М.С. Остапенко, В.А. Шрайнер; под общей ред. М.Х. Утешева. Тюмень: Изд. «Вектор Бук», 2008. 160 с.
15. Artamonov E.V., Vasil'ev D.V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, is. 6, p. 404-405.
16. Пат. РФ №2665858 Российская Федерация, МПК В23В 27/22. Стружколомающая сменная режущая пластина с переменным передним углом / Труфанов Г. Г., Артамонов Е.В., Васильев Д.В.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет (RU). № 2017133388; заявл. 25.09.2017; опубл. 04.09.2018, Бюл.№25.
17. Пат. РФ №2658559 Российская Федерация, МПК В23В1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Чернышов М. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет" (ТИУ) (RU). №2017119585; заявл. 05.06.2017; опубл. 21.06.2018, Бюл.№ 18.
18. Полетика М.Ф. Теория резания. Ч. 1. Механика процесса резания. Томск: Изд-во ТПУ, 2001.
19. Мокрицкий Б.Я. , Алтухова В.В., Саблин П.А. Повышение эффективности стружкообразования при колёсотокарной обработке // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 2. С. 33-38.
20. Розенберг Ю.А. Методы аналитического определения степени деформации металла стружки при резании // Вестник машиностроителя. 2001. №3. С. 34-38.

References

1. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 278 p. (In Russ.).
2. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [Method of similarity when cutting metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 152 p. (In Russ.).
3. Grigoriev S. N. *Metody povysheniya stoikosti rezhushchego instrumenta* [Methods of increasing the resistance of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011, 368 p. (In Russ.).

4. Poduraev V. N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting of hard-to-work materials]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1974, 587 p. (In Russ.).
5. Adaskin A.M., Butrim V. N., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A. S., Kashirtsev V. V. Vliyanie skorosti rezaniya na struzhkobrazovanie pri tochenii zharoprochnykh splavov na osnove khroma i nikelya [Influence of cutting speed on chip formation when turning high-temperature alloys based on chromium and Nickel]. *STIN = STIN*, 2014, no. 10, pp. 23-27 (In Russ.).
6. Celine Eric, Halbower Löf, Ronnie Altigen. *Plastina dlya tokarnoi obrabotki rezaniem i tokarnyi instrument* [Plate for lathe machining and lathe tool]. Patent RF, no. 2664348, 2018.
7. Mikhailov S. V., Skvortsov D. S. *Smennaya rezhushchaya plastina* [Replaceable cutting plate]. Patent RF, no. 2237549, 2004.
8. Vasin S. A., Vasin L. A., Ivanov V. V., Lavit I. M., Khludov S. Ya., Denisov E. P., Denisov I. E. *Rezhushchaya plastina* [Cutting plate]. Patent RF, no. 2252839, 2005.
9. Madzima Sinia. *Rezhushchaya plastina* [Cutting plate]. Patent RF, no. 2532612, 2014.
10. Mikhailov S. V., Oleinik A. P. *Smennaya rezhushchaya plastina* [Replacement plate]. Patent RF, no. 2364475, 2008.
11. Matveev V. S., Bannov K. V., Gradoboev A.V., Kopnova R. D., Nesterenko V. P. *Rezhushchaya mnogogrannaya smennaya plastina* [Cutting polyhedral replaceable plate]. Patent RF, no. 2327549, 2008.
12. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 344 p. (In Russ.).
13. Vasin S. A., Vereshchaka A. S., Kushner B. C. *Rezanie materialov: Termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosvyazei pri rezanii* [Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of relationships in cutting]. Moscow, MSTU publishing House. N. E. Bauman Publ., 2001, 448 p. (In Russ.).
14. Artamonov E. V., Vasilega D. S., Ostapenko M. S., Schreiner V. A. *Rabotosposobnost' instrumentov i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki instrumental'nykh tverdykh splavov i obrabatyvaemykh materialov* [Performance of tools and physical and mechanical characteristics of structural hard alloys and processed materials]. Tyumen, Vektor Buk Publ., 2008, 160 p. (In Russ.).
15. Artamonov E. V., Vasil'ev D. V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, is. 6, pp. 404-405.
16. Trufanov G. G., Artamonov E. V., Vasiliev D. V. *Struzhkolo-mayushchaya smennaya rezhushchaya plastina s peremennym perednim uglom* [Chip-breaking replaceable cutting plate with variable front angle]. Patent RF, no. 2665858, 2018.

17. Artamonov E. V., Vasiliev D. V., Chernyshov M. O. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya* [Method of determining the optimal cutting speed]. Patent RF, no. 2658559, 2018.
18. Poletika M. F. *Teoriya rezaniya. Mekhanika protsessa rezaniya* [Theory of cutting, Mechanics of the cutting process]. Tomsk, 2001 (In Russ.).
19. Mokritskiy B. Ya., Altukhova V. V., Sablin P. A. Povyshenie effektivnosti struzhkoobrazovaniya pri kolesotokarnoi obrabotke [Improving the efficiency of chip formation in wheel-rolling processing]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of Mechanical Engineering and Automation*, 2013, no. 2, pp. 33-38 (In Russ.).
20. Rosenberg J. A. Metody analiticheskogo opredeleniya stepeni deformatsii me-talla struzhki pri rezanii [Analytical Methods for determining the degree of deformation of the metal chips when cutting]. *Vestnik mashinostroytelya = Vestnik of Mechanical Engineering*, 2001, no.3, pp. 34-38 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Артамонов Евгений Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Evgeny V. Artamonov, Dr. of Sci.
(Engineering), Professor, Head of the Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Васильев Дмитрий Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: vasilievdv@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Dmitriy V. Vasil'yev, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: vasilievdv@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Чернышов Михаил Олегович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: chernyshovmo@tyuiu.ru

Mikhail O. Chernyshov, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: chernyshovmo@tyuiu.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-23-34>

Моделирование и исследование стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей при обработке протяженных РК-профильных валов

В. В. Куц¹, В. В. Пономарев¹ ✉

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

✉ e-mail: ponomarev@ascon.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование посвящено повышению стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей при обработке РК-профильных валов при сохранении требуемого качества обработки поверхности.

Методы. Формообразование РК-профилей методом фрезерования дисковой фрезой с конструктивной радиальной подачей позволяет получить необходимое качество поверхности при высокой производительности обработки. Вследствие того, что условия обработки для каждой режущей пластины различны, необходимо проведение исследований стойкости сменных многогранных пластин (СМП) и поиск конструктивных решений для сокращения диапазона изменения стойкости, при сохранении качества обработки поверхности РК-профиля. Исследовано влияние применения неравномерного шага расположения как на качество обработки, так и на стойкость каждой отдельной режущей пластины.

Результаты. В работе представлен метод расчета величин стойкости СМП сборной дисковой фрезы при обработке протяженных РК-профиля вала с учетом индивидуальных условий их работы, а именно: скорость резания, подачи на зуб, ширины фрезерования и диаметрального положения СМП. Выполнен анализ влияния конструктивных параметров фрезы на изменение диапазона значений стойкости СМП и предложены рекомендации по его уменьшению. Также определены основные конструктивные параметры, влияющие на изменение диапазона стойкости.

Заключение. Разработанная методика позволяет определить параметры сборного режущего инструмента для обработки РК-профиля с требуемой точностью и приемлемым диапазоном изменения стойкости. Полученные результаты позволяют спроектировать инструмент с прогнозируемым периодом стойкости, соответствующим принятым минимальным значениям.

Ключевые слова: РК – профиль; фреза; математическая модель; формообразование; отклонение профиля; сменная многогранная пластина; стойкость режущего инструмента.

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

Для цитирования: Куц В. В., Пономарев В. В. Моделирование и исследование стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей при обработке протяженных РК-профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 23-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-23-34>.

Поступила в редакцию 17.12.2019

Подписана в печать 10.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Modeling and Research of Resistance Characteristics of an Interlocking Side Milling Cutter with a Constructive Radial Feed When Processing Extended RK-profile Shafts

Vadim V. Kuts¹, Vasily V. Ponomaryov¹ ✉

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

✉ e-mail: ponomarev@ascon.ru

Abstract

Purpose of research. The study is devoted to improving the resistance characteristics of an interlocking side milling cutter with a constructive radial feed when processing extended RK profile shafts while maintaining the required quality of surface treatment.

Methods. Forming of RK profiles by milling with a disk cutter with a constructive radial feed allows you to obtain the required surface quality with high processing productivity. Due to the fact that the processing conditions for each cutting insert are different, it is necessary to study the resistance of interchangeable polyhedral inserts (IPI) and to search for structural solutions to reduce the range of change in resistance, while maintaining the quality of surface treatment of the PK profile. The influence of the use of an uneven pitch of location both on the quality of processing and on the resistance of each individual insert is studied.

Results. The paper presents a method for calculating the resistance of an IPI of a interlocking side milling cutter during processing of an extended RK profile of a shaft, taking into account the individual conditions of their operation, namely: cutting speed, feed to the tooth, milling width and the diametrical position of the IPI

Conclusion. The analysis of the influence of the structural parameters of the cutter on changing the range of values of the resistance of IPI is made, and recommendations for its reduction are proposed. The main design parameters that affect the change in the resistance range are also identified.

Keywords: RK-profile; milling cutter; mathematical model; shaping; profile deviation; interchangeable polyhedral insert; cutting tool resistance.

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

For citation: Kuts V. V., Ponomaryov V. V. Modeling and Research of Resistance Characteristics of an Interlocking Side Milling Cutter with a Constructive Radial Feed When Processing Extended RK-profile Shafts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 23-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-23-34>.

Received 17.12.2019

Accepted 10.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Применение в современном производстве РК-профилей для соединения деталей вместо распространенных шпо

ночных и шлицевых соединений ограничивается трудоемкостью получения рабочих поверхности деталей в данном соединении. Несмотря на то, что суще-

ствует множество методов обработки РК-профилей [1-17], они остаются трудоемкими и нетехнологичными, особенно для деталей с протяженными участками РК-профиля.

В работе [18] рассмотрен вариант обработки длинных валов с применением специального инструмента – сбор-

ной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей, которой сообщают осевую подачу (рис. 1). Данный способ позволяет обрабатывать детали с протяженными участками РК-профиля, например таких, как штанги буровых установок, передающих значительный крутящий момент.

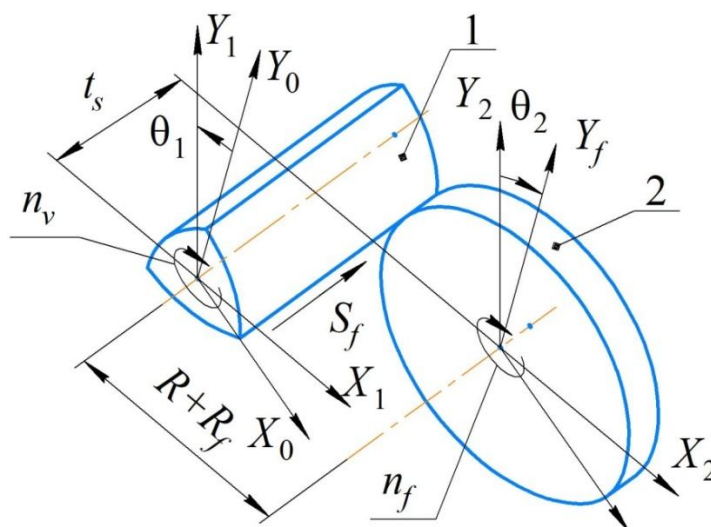


Рис. 1. Схема обработки длинного вала с РК-профилем фрезой с конструктивной радиальной подачей

Fig. 1. Long shaft processing scheme with RK-profile cutter with a constructive radial flow

Конструкция данной фрезы со СМП должна обеспечивать требуемую точность обработки, характеризуемую, в частности, величиной допуска погрешности формы обработанного вала в радиальном направлении ($T\Delta_r$).

В работе [19] был приведен метод расчета погрешности обработки РК-профильного вала, что позволило, в частности, при заданной величине среднего радиуса фрезы R_f и допустимой погрешности обработки определять необходимое минимальное количество СМП (табл.1).

Также, для конструкции фрезы с равномерным угловым шагом распо-

ложения СМП была установлена величина неравномерности погрешности обработки различных участков профиля вала, в связи с чем было предложено располагать СМП с переменным угловым шагом. Был разработан метод расчета угловых шагов СМП из условия обеспечения равномерности погрешности обработанного профиля, соответствующей различным квалитетам точности.

На рис. 2 представлен результат расчета углового шага СМП относительно углового положения предыдущей СМП при радиусе фрезы $R_f = 200$ мм для различных квалитетов точности, обработанного вала.

Таблица 1. Расчетное количество пластин СМП в зависимости от среднего радиуса фрезы и качества точности [19]

Table 1. The estimated number of SMP plates is based on the average radius of the cutter and the accuracy qualifier [19]

	$T\Delta_r, \text{ мкм} / ITn$				
$R_f, \text{ мм}$	13,8/IT8	22,2/IT9	36/IT10	57/IT11	100/IT12
200	40	32	25	20	15
150	41	32	25	20	15
100	41	33	26	21	16

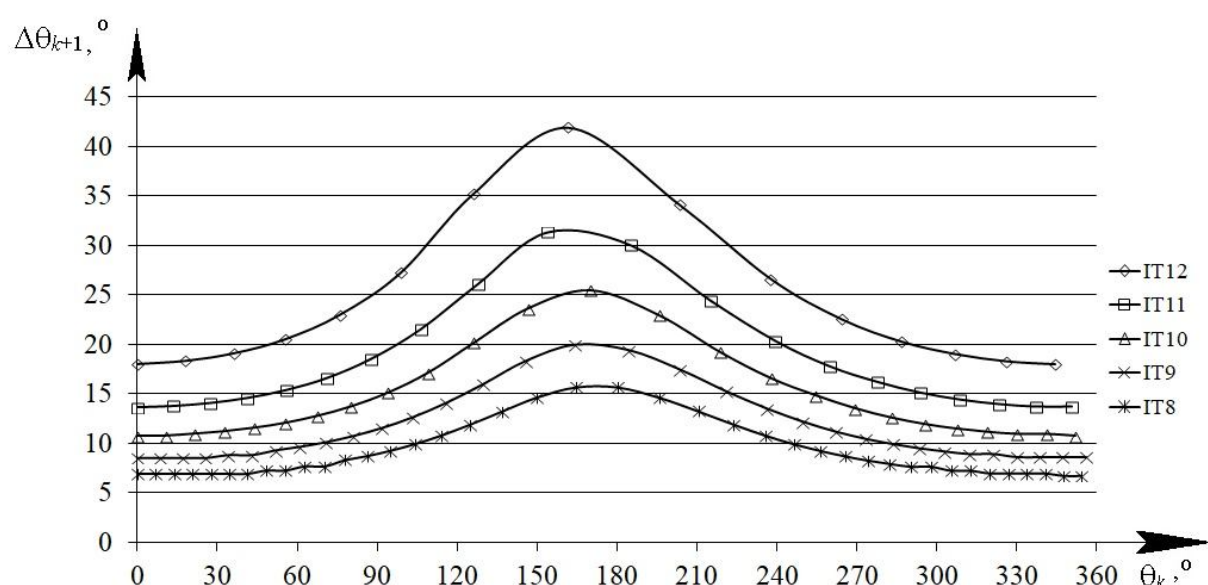


Рис. 2. Зависимость углового шага размещения СМП от качества точности при радиусе фрезы $R_f = 200 \text{ мм}$ [14]

Fig. 2. The dependence of the angular step of placing SMP on the accuracy qualifier at the radius of the R_f cutter is 200 mm [14]

Материалы и методы

Для получения работоспособной конструкции данной фрезы необходимо выполнить подбор конструктивных параметров проектируемой фрезы и режимов резания, обеспечивающих экономически целесообразные показатели стойкости. Оценка стойкости каждой СМП фрезы может быть выполнена на

основе известных стойкостных зависимостей [20] с учетом особенностей процесса съема припуска.

Так стойкость i -й СМП фрезы будем рассчитывать по формуле

$$T_i = \sqrt[m]{\frac{C_v \cdot D_i^q}{V_i \cdot t_i^x \cdot S_{z_i}^y \cdot B_i^u \cdot Z_i^p}} \cdot K_v, \quad (1)$$

где D_i – диаметральное положение i -й СМП;

S_{zi} – усредненная величина подачи на зуб i -й СМП;

t_i – глубина обработки, соответствующая i -й СМП;

B_i – ширина обработки, соответствующая i -й СМП;

Z_i – приведенное число зубьев;

C_v, q, m, x, y, u, p – коэффициенты и показатели степени;

K_v – общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания [8].

Диаметральное расположение i -й СМП можно определить как

$$D_i = |\bar{r}_{fi}(\theta_i)|, \quad (2)$$

где $\bar{r}_{fi}(\theta_i)$ – векторное уравнение профиля производящей поверхности, определяющее точку установки СМП;

θ_i – угловой шаг соответствующей i -й СМП.

Усредненную величину подачи на зуб для i -й СМП определим как

$$S_z = \frac{\int_{S_n}^{S_k} S_z(S) dS}{S_k - S_n}, \quad (3)$$

где S_n, S_k – параметр длины режущей кромки i -й СМП, соответствующей граничным точкам режущей кромки, контактирующим со срезаемым слоем;

$S_z(S)$ – функция величины подачи на зуб в заданной точке режущей кромки;

S – параметр длины режущей кромки i -й СМП.

Глубина обработки, соответствующая i -й СМП в проекции на плоскость XOY определяется как

$$t_i = |\bar{Q}_i(S, \tau_k) - \bar{Q}_i(S, \tau_n)|_{XOY}, \quad (4)$$

где $\bar{Q}_i(S, \tau_k), \bar{Q}_i(S, \tau_n)$ – точки на поверхности резания, образованной движением точки (S) режущей кромки i -й СМП от момента времени начала контакта с припуском (τ_n) и окончания контакта (τ_k).

Скорость резания V_i определяем как

$$V_i = |\bar{Q}_{it}(S, \tau_k)|, \quad (5)$$

где $\bar{Q}_{it}(S, \tau_k)$ – производная поверхности резания по времени, соответствующая моменту времени τ_k .

Усредненная величина ширины обработки определяется по формуле

$$B_i = \frac{\int_{\tau_n}^{\tau_k} B(\tau) d\tau}{\tau_k - \tau_n}, \quad (6)$$

где $B(\tau)$ – ширина фрезерования, соответствующая режущей кромке i -й СМП в момент времени τ .

Приведенное число зубьев определим как

$$z_i = \left| \frac{2\pi}{\theta_i} \right|. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение

На рис. 3. показан результат расчета величины стойкости СМП фрезы с параметрами $R_f = 200$ мм и $Z = 25$ при постоянном и переменном угловом шаге при обработке вала с РК-профилем с параметрами $R = 80$ мм и эксцентриситетом $e = 3,4$.

Из рис. 3 видно, что диапазон значений стойкости СМП ΔT при постоянном шаге составляет более 400 мин., при переменном около 110 мин. Таким образом, можно утверждать, что применение неравномерного шага позволя-

ет снизить диапазон стойкости почти в 3 раза и повысить общую стойкость инструмента более чем на 25% при одинаковых режимах обработки.

На рис. 4 показаны результаты исследования изменения величины диапа-

зона стойкости для фрезы с $R_f = 200$ мм и разным числом СМП.

На рис. 5 указано изменение диапазона стойкости ΔT при различном количестве СМП для фрез с различным радиусом.

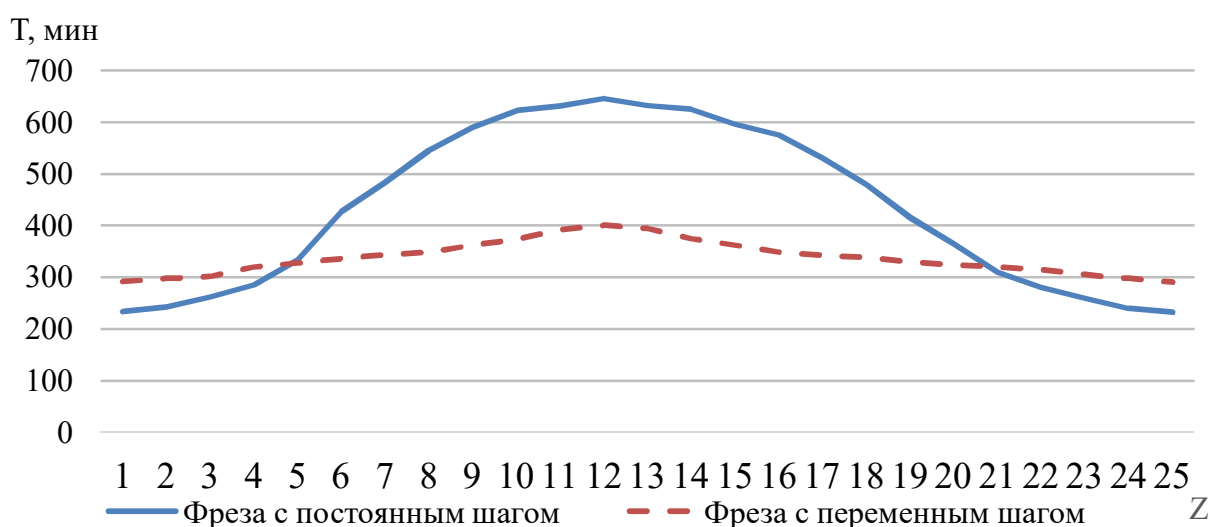


Рис. 3. Расчетная стойкость режущих пластин при равномерном и переменном шаге

Fig. 3. Estimated durability of cutting plates at uniform and variable step plates

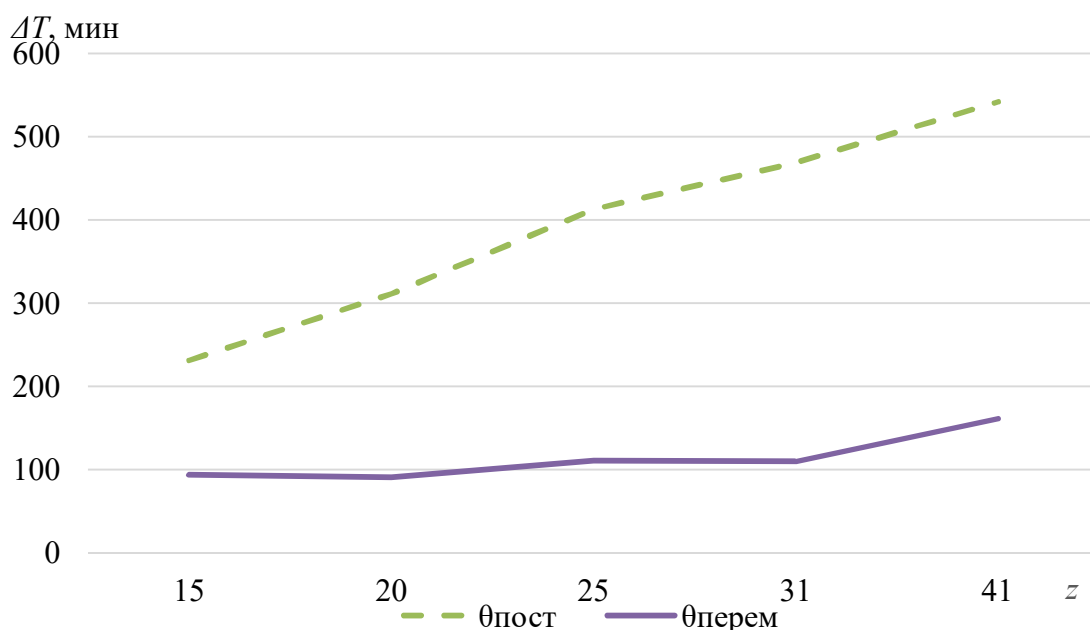


Рис. 4. Изменение диапазона стойкости ΔT зубьев фрезы ($R_f = 200$ мм) при постоянном и переменном шаге расположения

Fig. 4. Changing the durability range ΔT of the cutter teeth ($R_f = 200$ mm) at a constant and variable position step

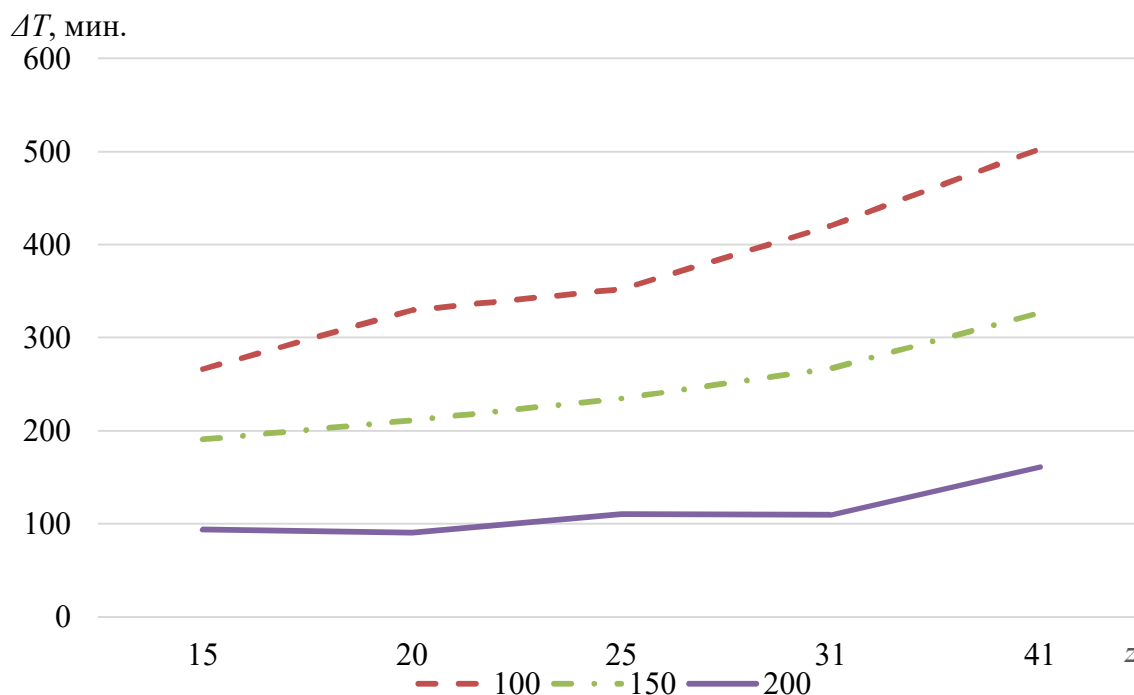


Рис. 5. Изменение диапазона стойкости ΔT зубьев фрезы при разном R_f

Fig. 5. Change in the durability range ΔT of the cutter teeth at different R_f

Выводы

Полученные данные позволили определить, что диапазон изменения стойкости (см. рис. 4) при расположении пластин с переменным шагом уменьшается на 59,4% для фрезы с 15 СМП, до 70,3 % – для фрезы с 41 СМП при радиусе фрезы $R_f = 200$ мм. Следует также отметить, что увеличение радиуса фрезы R_f (см. рис. 5) при переменном шаге установки пластин приводит к уменьшению диапазона изменения стойкости

на 58,8% при количестве пластин $Z = 15$, до 68% при $Z = 41$. Следовательно, увеличение количества зубьев фрезы как и увеличение среднего радиуса фрезы приводят к снижению отклонений стойкости и повышению ее минимального уровня для инструмента. Необходимо также учитывать ограничения на габариты и массу инструмента, накладываемые технологическими возможностями оборудования, что является основанием для дальнейших исследований

Список литературы

1. Razumov M.S., Gladyshekin A.O., Pykhtin A.I. Evaluation of rational quantity of profile moment-transferring joints sides. Source of the Document Tehnicki Vjesnik. 2016. № 23 (2). P. 575 -577.

2. Емельянов С.Г., Гладышкин А.О., Разумов М.С. Автоматизация технологической подготовки производства профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1. Ч.1. С. 164-168.
3. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Анализ погрешности формы профильного вала при обработке фасонным долбяком // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. Ч.1. С. 54-57.
4. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Аспекты контроля профильных соединений на базе треугольника РЕЛО // Сборник научных трудов Sworld. 2013. Т. 4. № 2. С. 92-94.
5. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Метод генераторной обработки профильных валов долбяками // Машиностроение -основа технологического развития России (ТМ-2013): материалы V Международной науч.-практ. конф. Курск, 2013. С. 440-442.
6. Пат. 2463129 Российская Федерация, МПК В23В 5/44. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины / Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. № 2011110843/02; заявл. 22.03.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. №28.
7. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Особенности изготовления долбежного инструмента для обработки профильных соединений // Техника и технологии: Пути инновационного развития: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2012. С. 36-39.
8. Определение положения зубьев охватывающей фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных валов / А.В. Исаев, В.В. Куц, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, М.А. Сидорова // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 3 (46). С. 112-115.
9. Разумов М.С., Гречухин А.Н., Пыхтин А.И. Определение погрешности формы при полигональном точении многогранников с нечетным количеством граней // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск, 2014. С. 137 -140.
10. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Метод генераторной обработки профильных валов долбяками // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013): материалы V Международной научно-практической конференции. Курск, 2013. С. 440-442.
11. Шитиков А.Н. Анализ методов изготовления РК-профильных валов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 4. С. 54-56.
12. Шитиков А.Н. Обеспечение качества изготовления РК-профильных валов методом фасонного фрезерования. Курск, 2015.

13. Боголюбов А.В. Геометрические характеристики РК-профиля и эквидистантные профили // Фундаментальные физикоматематические проблемы и моделирование технико-технологических систем: сб. научн. тр. Вып. 4. М.: Изд.-во «Станкин», 2001. С. 208-213.

14. Куц О.Г., Агеев Е.В., Мальнева Ю.А. Оценка погрешности положения и ориентации сменных многогранных пластин дисковой фрезы для обработки РК-профильного вала // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции (24-25 сентября 2015 года): в 3 т. Курск, 2015. Т. 2. С.130-138.

15. Куц О.Г., Агеев Е.В. Выполнение синтеза структур в рамках методологии структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции (24-25 сентября 2015 года): в 3 т. Курск, 2015. Т. 2. С.139-146.

16. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Горохов А.А. Способы обработки профильных валов фрезами с радиальной конструктивной подачей // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения: материалы Международной научно-технической конференции. Курск, 2015. С. 156-158.

17. Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Синтез производящих поверхностей фрез - протяжек для обработки валов с равноосным контуром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 8. С. 42-48.

18. Куц В.В., Пономарев В.В. Построение модели формообразования длинных валов с РК-профилем сборной дисковой фрезой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 2(322). С.110-115

19. Куц В.В., Пономарев В.В. Метод определения положения зубьев сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 81-85.

20. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. М.: Машиностроение, 2003. 694 с.

References

1. Razumov M.S., Gladyshevskiy A.O., Pykhtin A.I. Evaluation of the rational quantity of profile moment-transferring joints sides. *Source of the Document By Tehnicki Vjesnik*, 2016, no. 23 (2), pp. 575 -577.

2. Emelyanov S.G., Gladyshevskiy A.O., Razumov M.S. Avtomatizatsiya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva profil'nykh valov [Automation of technological preparation of

the production of profile shafts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1, pp. 164-168 (In Russ.).

3. Barbotko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. Analiz pogreshnosti formy profil'nogo vala pri obrabotke fasonnym dolbyakom [Analysis of the error of the shape of the profile shaft in the treatment of the style-style dolbyak]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no.2-1, pp. 54-57 (In Russ.).

4. Barbotko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. Aspekty kontrolya profil'nykh soedinenii na baze treugol'nika RELO [Aspects of control of profile connections on the basis of the triangle RELOT]. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld* = *Sworld's collection of scientific works*, 2013, vol. 4, no 2, pp. 92-94 (In Russ.).

5. Barbotko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. [Method of generator processing of profile shafts by dolbyaks]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Mashinostroenie -osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii (TM-2013)"* [Materials V international scientific and practical conference "Mechanical Engineering -the basis of technological development of Russia (TM-2013)"]. Kursk, 2013, pp. 440-442 (In Russ.).

6. Barbotko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. *Sposob obrabotki profil'nogo vala so storonami ravnoi shiriny*. [How to handle a profile shaft with sides of equal width]. Patent RF, no. 2463129, 2011A (In Russ.).

7. Barbotko A.I., Ponkratov P.A., Razumov M.S. [Features of manufacturing slotting tools for processing profile joints]. *Materialy 2-i Mezhdunar. nauch.-prakt. konfi. "Tekhnika i tekhnologii: Puti innovatsionnogo razvitiya"* [Materials 2nd Internar. science.-practical confit. "Technology and Technology: Ways of Innovation Development"]. Kursk, 2012, pp. 36-39 (In Russ.).

8. Isaev A.V., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Sidorova M.A. Opreделение polozheniya zub'ev okhvatyvayushchei frezy s radial'noi konstruktivnoi podachei dlya obrabotki RK-profil'nykh valov [Determining the position of teeth covering the cutter with a radial constructive supply for processing RK-profile shafts]. *Vestnik MGTU Stankin* = *Vestnik MSTU "STANKIN"*, 2018, no. 3 (46), pp. 112-115 (In Russ.).

9. Minds M.S., Grechukhin A.N., Pykhtin A.I. [Determining the error of form at polygonal reading of polygonal dots with an odd number of faces]. *Elektrotehnika. Energetika. Mashinostroenie. Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Electrotechnics Electrical engineering. Energy. Mechanical engineering: collection of scientific papers of the I International scientific conference of young scientists]. Novosibirsk, 2014, pp. 137-140 (In Russ.).

10. Barbotko A.I., Poncrates P.A., Razumov M.S. [The method of generator processing of profile shafts by the Lobbys]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Mashinostroenie - osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii (TM-2013)"* [Mate-

rials V of the International Scientific and Practical Conference "Mechanical engineering - the basis of technological development of Russia (TM-2013)". Kursk, 2013, pp. 440-442 (In Russ.).

11. Shitikov A.N. Analiz metodov izgotovleniya RK-profil'nykh valov [Analysis of the methods of making RK-profile shafts/devices and systems]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and Systems: Monitoring, Control and Diagnostics*, 2005, no. 4, pp. 54-56 (In Russ.).

12. Shitikov A.N. Obespechenie kachestva izgotovleniya RK-profil'nykh valov metodom fasonnogo frezerovaniya [Ensuring the quality of production of RK-profile shafts by the method of shaped milling]. Kursk, 2015 (In Russ.).

13. Bogolyubov A.V. [Geometric characteristics of RK-profile and ecvidistic profiles]. *Sb. nauchn. tr. "Fundamental'nye fizikomatematicheskie problemy i modelirovanie tekhniko-tekhnologicheskikh sistem"*. [Fundamental physical problems and modeling of technical and technological systems], Moscow, Stankin Publ., 2001, vol. 4, pp. 208-213 (In Russ.).

14. Kutz O.G., Ageev E.V., Malneva Y.A. [Assessment of the error of position and orientation of interchangeable multifaceted plates of disk cutter for processing the RK-profile shaft]. *Progressivnye tekhnologii i protsessy. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Progressive Technologies and Processes. Collection of scientific articles of the 2nd International Youth Science and Practical Conference]. Kursk, 2015, vol. 2, pp.130-138 (In Russ.).

15. Kutz O.G., Ageev E.V. [Performing the synthesis of structures within the framework of the methodology of structural and parametric synthesis of metal cutting systems]. *Progressivnye tekhnologii i protsessy. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Progressive Technologies and Processes. A collection of scientific articles of the 2nd International Youth Science and Practical Conference]. Kursk, 2015, vol. 2, pp.139-146 (In Russ.).

16. Kuts V.V., Malneva J.A., Gorokhov A.A. [Ways of processing profile shafts with radial constructive supply "Text"]. *Problemy i dostizheniya v innovatsionnykh materialakh i tekhnologiyakh mashinostroeniya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. [Problems and achievements in innovative materials and technologies of mechanical engineering. Materials of the International Science and Technology Conference]. Kursk, 2015, pp. 156-158 (In Russ.).

17. Kuts V.V., Ivacahnenko A.G., Storublev M.L. Sintez proizvodnyashchikh poverkhnostei frez - protyazhek dlya obrabotki valov s ravnoosnym konturom [Synthesis of the surface-producing cutters - lengths for the processing of shafts with an equal-egalitated contour]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2012, no. 8, pp. 42-48 (In Russ.).

18. Kuts V.V., Ponomarev V.V. Postroenie modeli formoobrazovaniya dlinnykh valov s RK-profilom sbornoj diskovoi frezoi [Building a model of forming long shafts with a RK-profile of the national disc cutter]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = *Fundamental and Applied Problems of Technology and Technology*, 2017, no. 2(322), pp.110-115 (In Russ.).

19. Kuts V.V., Ponomarev V.V. Metod opredeleniya polozheniya zub'ev sbornoj diskovoi frezy s konstruktivnoi radial'noi podachei [The method of determining the position of the teeth of the national disc cutter with a constructive radial supply]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no 6, pp. 81-85 (In Russ.).

20. Kosilova A.G. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [The handbook of the machine-builder]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 694 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-3244-1359>

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Engineering Technology and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-3244-1359>

Пономарев Василий Владимирович, старший преподаватель кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ponomarev@ascon.ru

Vasiliy V. Ponomarev, Senior Lecturer, Engineering Technology and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ponomarev@ascon.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-35-51>

Повышение эффективности зубофрезерования путем создания сборных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами

Е. В. Артамонов¹, В. В. Киреев¹, В. А. Зырянов¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
ул. Володарского, 38, г. Тюмень 625000, Российская Федерация

✉ e-mail: zyrjanovva@tyuiu.ru

Резюме

На сегодняшний день при обработке червячными фрезами отечественного производства по ГОСТ 9324-80 возникает проблема в их стойкости на этапе черновой обработки. Российскими инструментальными фирмами, которые занимаются производством металлорежущего инструмента, в настоящее время не предлагается сборного червячного инструмента с режущими элементами из инструментального твердого сплава для механической обработки крупномодульных зубчатых колес.

Цель исследования: создание сборных конструкций для машиностроительных предприятий со сменными режущими твердосплавными пластинами (СРТП). Благодаря этому в несколько раз повышается производительность уже имеющегося на предприятии оборудования, экономическая эффективность от внедрения качественного металлорежущего инструмента позволяет закупить современное оборудование и сделать работу операторов станков на машиностроительных предприятиях более эффективной и менее трудоемкой.

Методы. Методом исследования является применение графического имитационного моделирования, позволяющего определить величину площадей поперечного сечения срезаемого слоя для режущих элементов червячного инструмента.

Результаты. В данной работе предлагается принципиально новое техническое решение, позволяющее повысить эффективность механической обработки зубчатых колес металлорежущим инструментом, с расположением сменных режущих твердосплавных пластин в сборном исходном контуре производящей рейки в червячных фрезах. Повышение эффективности обработки будет достигаться реализацией групповой схемы резания в сборной червячной фрезе путем применения большего количества основных и боковых режущих твердосплавных пластин на архимедовом инструментальном червяке, позволяющих последовательно срезать припуск на обработку и уменьшить величину подачи на режущую пластину, обеспечить равномерность фрезерования на всем этапе обработки, а также снизить величину ударных нагрузок на режущие твердосплавные элементы сборного инструмента.

Заключение. Применение сменных твердосплавных пластин при групповой схеме резания повышает стойкость и надежность сборной червячной фрезы.

Ключевые слова: фрезерование; твердые сплавы; сборные фрезы; прогрессивная схема резания; напряжения в режущих элементах.

Для цитирования: Артамонов Е. В., Киреев В. В., Зырянов В. А. Повышение эффективности зубофрезерования путем создания сборных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 35-51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-35-51>.

Поступила в редакцию 25.11.2019

Подписана в печать 09.12.2019

Опубликована 21.02.2020

© Артамонов Е. В., Киреев В. В., Зырянов В. А., 2020

Improving Gear Milling Efficiency by Creating Prefabricated Cutters with Replaceable Cutting Carbide Plates

Evgeny V. Artamonov ¹, Vitaly V. Kireev ¹, Vitaly A. Zyryanov ¹ ✉

¹ Industrial University of Tyumen
38 Volodarskogo str., Tyumen 625000, Russian Federation

✉ e-mail: zyrjanovva@tyuiu.ru

Abstract

Today, when machining domestic-made worm milling cutter according to GOST 9324-80, a problem arises in their durability at the roughing stage. Russian tool companies engaged in the manufacture of metal cutting tools do not currently offer prefabricated worm tools with cutting elements made of hard alloy tools for machining large-modular gears.

Purpose of research. Creation of prefabricated structures for machine-building enterprises with replaceable cutting carbide plates (RCHAP). Due to this, the productivity of equipment already available at the enterprise is increased several times, the economic efficiency of introducing high-quality metal-cutting tools makes it possible to purchase modern equipment and make the work of machine operators at machine-building enterprises more efficient and less time-consuming. In this paper, we propose a fundamentally new technical solution, which makes it possible to increase the efficiency of machining gears with a metal-cutting tool, with the arrangement of replaceable carbide cutting plates in the prefabricated initial contour of the manufacturing rail in worm milling cutters

Methods. The research method is the use of graphic simulation, which allows you to determine the size of the cross-sectional area of the cut layer for the cutting elements of the worm tool.

Results. Improving the processing efficiency will be achieved by implementing a group cutting scheme in a prefabricated worm milling cutter by using a larger number of main and side carbide cutting inserts on an Archimedean tool worm, which allow sequentially cutting the machining allowance and reducing the feed rate to the cutting insert, to ensure milling uniformity throughout the processing stage, and also reduce the magnitude of shock loads on cutting carbide elements of a precast tool.

Conclusion. The use of replaceable carbide plates in a group cutting scheme increases the durability and reliability of a precast worm cutter.

Keywords: milling; hard alloys; prefabricated cutters; progressive cutting pattern; stresses in cutting elements.

For citation: Artamonov E.V., Vasil'yev D. V., Chernyshov M.O. Improving Gear Milling Efficiency by Creating Prefabricated Cutters with Replaceable Cutting Carbide Plates. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 35-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-35-51>.

Received 25.11.2019

Accepted 09.12.2019

Published 21.02.2020

Введение

В настоящее время при обработке червячными фрезами отечественного производства по ГОСТ 9324-80 возни-

кает проблема в их стойкости на этапе черновой обработки, а для дальнейшей чистовой требуется перетачивание инструмента. Выходом из сложившейся ситуации может быть:

- применение зарубежных аналогов из быстрорежущих или твердосплавных материалов с измененной геометрией режущей части для обеспечения необходимого числа переточек;

- диагональное фрезерование на станках с числовым программным управлением;

- применение сборных червячных фрез российского производителя с оптимальными режимами обработки.

В зависимости от требуемой точности изготовленных зубчатых колес и типа производства применяется четыре вида фрез:

- монолитные со шлифовальным профилем;

- сборные фрезы с рейками;

- затылованные фрезы повышенной точности с нешлифованным профилем;

- фрезы червячные твердосплавные;

Производители металлорежущего инструмента выпускают различную номенклатуру червячных фрез различных конструкций и с разными техническими характеристиками, определяющими назначение фрезы и область ее применения:

- а) исходный контур – эвольвентный и неэвольвентный;

- б) конструкция – монолитные, составные, сборные.

В соответствии с ГОСТ 9224-80 сборные фрезы с поворотными рейками в отличие от цельных стандартных червячных фрез изготавливаются насадными, со вставными режущими рейками и расположены параллельно оси кор-

пуса инструмента. Таких групп можно выделить одиннадцать.

1. По назначению – чистовые, получистовые, черновые.

2. По виду последующей обработки – шевингование и шлифование.

3. По направленности винтовой линии – левые, правые.

4. По количеству заходов – однозаходные, двухзаходные, трехзаходные, многозаходные.

5. По рабочей длине инструмента – короткие, длинные.

6. По величине переднего угла (γ) – положительный, отрицательный, нулевой.

7. По виду материала (инструментального) режущей части – твердосплавные, быстрорежущие.

8. По конструкции корпуса инструмента – одноразовый, многоразовый.

9. По наличию износостойкого покрытия – однослойное, многослойное, покрытие отсутствует.

10. По форме производящего контура – модифицированный (прогрессивная, вершино-нагруженная, раздельная схема резания), стандартный.

11. По способу изготовления стружечной канавки – прямолинейные, винтовые.

При черновом фрезеровании зубчатых колес большого диаметра возникают большие силы резания, и первый зуб на входной части фрезы оказывается перегруженным вследствие образования толстой стружки. Для измерения этих сил в процессе зубообработки раз-

личными учеными было предложено несколько способов:

- способ уравнивания;
- способ торможения;
- способ пластических деформаций;
- способ анализа потребляемой мощности станка;
- способ измерений упругих деформаций тензометрическими датчиками.

Проведены многочисленные исследования и в результате выполненных работ учеными намечено несколько направлений, направленных на повышение стойкости инструмента и увеличения его производительности¹ [1-6].

Использование червячных фрез с оптимальным значением передних и задних углов будет способствовать повышению стойкости инструмента при зубообработке. Величины передних углов у червячных затылованных фрез обычно варьируются 0-5 градусов, задние углы – 10-12 градусов. Значение небольших передних углов не может обеспечить высокую стойкость фрез. Поэтому увеличение величины передних углов до 10-15 градусов способно повысить стойкость инструмента, однако снижается прочность зубьев червячного инструмента. Также для повышения стойкости возможно повысить ве-

личину задних углов на боковых участках режущих кромок фрез.

Однако существенно увеличить величину задних углов у затылованных фрез не представляется возможным, так как это приведет к образованию сколов и, тем самым, снизит прочность инструмента. Также эффективным средством повышения стойкости фрез является использование всей ее рабочей длины, чтобы износ инструмента был равномерным. Обычно наибольшему износу подвергаются последние два-четыре режущих зуба на одном витке, которые производят обработку впадины зубчатых колес. Другие режущие зубья, располагающиеся ближе к осевому перпендикуляру, подвергаются износу в меньшей степени. Поэтому осуществляют осевые перемещения инструмента на один или два витка для повышения стойкости фрез до снятия инструмента со станка. В данном случае стойкость инструмента повышается в 1,5 раза. На многих предприятиях осуществляется автоматическое передвижение фрез на пять-семь витков, что позволяет увеличить срок службы в 4-6 раз.

Эффективным средством повышения стойкости является механическая обработка зубчатых колес с одновременным применением разных видов подач инструмента, что реализуемо при диагональном фрезеровании. Применение данного метода позволяет помимо вертикальной подачи обеспечивать подачу инструмента вдоль его оси, с целью обработки всей рабочей частью

¹ Ничков А.Г. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами: дис. ... д-ра техн. наук. Свердловск, 1991. 566 с.

червячной фрезы. Этот метод позволяет достичь равномерного износа по всей длине инструмента и увеличить стойкость фрез в 3 раза по сравнению с осевыми перемещениями и понизить шероховатость поверхности зубьев колеса.

Зубофрезерование с наибольшей величиной подачи и максимальными толщинами срезаемых слоев позволяет существенно повысить производительность червячных фрез при любых способах зубофрезерования. Увеличение толщин срезаемых слоев также возможно с применением многозаходного инструмента. Применение многозаходных фрез при обработке зубчатых колес по сравнению с однозаходными при их одинаковой стойкости позволяет существенно повысить производительность. Но чаще всего многозаходные фрезы рекомендуют применять при обработке зубчатых колес небольших модулей, с числом зубьев больше 16, с обеспечением небольших слоев срезаемого слоя. За рубежом в производстве очень часто при обработке зубчатых колес малого модуля используются 2 – 6 заходные червячные фрезы. Однако как и любой инструмент многозаходные фрезы имеют и свои недостатки. Фрезы имеют меньшее число режущих кромок, обеспечивающих профилирование зубчатого колеса, что влечет за собой вероятность возникновения погрешностей профиля и нежелательной шероховатости после обработки. В прямой пропорциональности заходности фрезы происходит увеличение угла подъема винтовой линии, что тоже приводит к по-

грешностям на эвольвентном профиле зубчатого колеса. Поэтому применение многозаходных фрез не рекомендуется, а иногда и невозможно при чистовом зубофрезеровании и применяется в большинстве случаев только при черновой обработке.

Не стоит забывать о важном моменте – о виде направления подачи при фрезеровании. Многие исследователи в данной области этой проблемы отмечают, что попутный вид зубофрезерования существенно снижает износ по задней поверхности зубьев фрезы. Зубообработка с попутной подачей при одинаковой стойкости инструмента позволяет работать на скоростях на 20-40% выше по сравнению со встречной подачей, что приводит к повышению точности обработки зубчатых колес, снижается шероховатость эвольвентного профиля колеса и станок испытывает меньшие нагрузки. Фрезерование с попутной подачей влечет за собой перераспределение нагрузки на режущие зубья инструмента. Так как режущие кромки при таком виде обработки срезают достаточно тонкие и длинные слои, что существенно отличается от получаемых слоев при встречной подаче. А уменьшение толщин срезаемых слоев и величины их площадей приводит к уменьшению сил резания и величины износа инструмента¹ [7-11].

¹ Николаев В.К. Сравнительное исследование попутного и встречного фрезерования прямозубых колес червячной фрезой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1960. 18 с.

Исследования, проведенные А.И. Бетанели, показали изменяемость возникающих напряжений в зубе червячного инструмента при встречном, попутном и симметричном виде фрезерования. При встречном виде фрезерования зубья инструмента начинают обработку с нулевой толщины среза и в конце достигает максимальной величины. С увеличением толщины срезаемого слоя нейтральная линия перемещается вглубь режущей части [12], в зоне выхода инструмента возникает наибольшая область напряжений растяжения, и скалывание происходит без удара. Поэтому предельные толщины срезаемого слоя имеют максимальное значение. При попутном виде фрезерования, зуб начинает обработку с максимальной толщиной среза и врезание происходит с ударом. В этот момент врезания в режущей части инструмента величина напряжений растяжения будет максимальной, что приводит к скалыванию в момент начального врезания. А предельные толщины среза имеют максимальное значение. При повышении скорости резания предельные толщины срезаемых слоев при зубофрезеровании увеличиваются и при определенных значениях становятся больше, чем при токарной обработке.

Ткемиладзе Г.Н., Тотчиев Ф.Г., Лоладзе Т.Н. при исследованиях методом фотоупругости напряженно-деформированного состояния в режущем клине инструмента было установлено соответствие главных напряжений растяже-

ний σ_1 при различных схемах процесса резания.

Исследования показали, что методы обработки строганием и попутным фрезерованием σ_1 в 1,4 – 1,6, при встречном фрезеровании в 1,7 – 1,8 раза выше, чем при методе обработки точением. Согласно этому рекомендуют уменьшать на 25 – 35% для строгания, попутного фрезерования предельные толщины среза, и на 40% – для встречного фрезерования, как показано на рис. 3, по сравнению с точением [13].

Все вышеперечисленные методы повышения производительности зубообработки зубчатых колес происходят без изменения схемы резания. Схема резания стандартного червячного инструмента несовершенна и отличается низкой производительностью. Основным ее недостатком является неравномерное загрузке режущих элементов по винтовой линии. Зуб, который удален от межосевого перпендикуляра, срезает большие слои по сравнению с другими. При приближении к межосевому перпендикуляру зубья инструмента срезают слои меньшие по размеру.

При увеличении величины подачи в процессе обработки зубчатых колес начинают работать удаленные зубья, срезающие наибольшие срезаемые слои. Считается, что лимитом величины подачи будет является прочность крайнего, наиболее загруженного зуба червячной фрезы, и если все зубья загрузить равномерно и часть нагрузки с крайних

распределить на другие зубья, которые располагаются ближе к центральному зубу, то червячный инструмент способен работать на больших подачах. Данные исследования доказали, что червячные фрезы с распределенной нагрузкой на режущие зубья могут работать на подачах до 20-25 мм/об, тем самым сократить время на обработку зубчатых колес [14]. Но и такие червячные фрезы имеют свои существенные недостатки:

- профиль зуба инструмента будет зависеть от модуля и числа зубьев обрабатываемого колеса, а также от значения подачи, на которых будет происходить обработка;

- в качестве образующей инструмента будет являться кривая: эллиптическая или парабола, что будет вносить трудности при проектировании и изготовлении фрезы;

- при работе на больших подачах на обработанной поверхности будут оставаться следы волнистостей и гребешков, что приведет к искажению эвольвентного профиля инструмента по высоте зуба;

- эффективность инструмента будет снижена из-за невозможности производить осевые перемещения, что повлияет на эксплуатационные качества фрезы;

- при зубообработке будет высокая деформация стружки как у стандартных червячных фрез из-за того, что режущие кромки будут срезать слои и образовываться сложная трехэлементная стружка.

Решением из сложившейся ситуации является применение фрез с новой, более совершенной, схемой резания.

С.Н. Медведицковым разработана новая схема резания, названная прогрессивной схемой резания [15]. Существенное отличие от стандартных червячных фрез является то, что у нее в конструкции имеются и завышенные, и одновременно зауженные зубья, которые чередуются через один с зубьями нормального профиля.

Прогрессивную схему резания, но уже на сборном инструменте реализовал в своих трудах В.В. Киреев. На основании имитационного моделирования и получившихся фрагментов площадей поперечного сечения срезаемых слоев зубьями фрезы удалось добиться разделения стружки на элементы [16, 17], что снижает нагрузки при ее формировании и удалении из зоны резания. Поэтому **целью данной работы** будет являться создание конструкции сборной червячной фрезы со сменными режущими твердосплавными элементами из инструментального твердого сплава, позволяющая разделять припуск на обработку на более простые фрагменты, снизить силы резания и повысить эффективность механической обработки.

С развитием технического прогресса и в соответствии с государственной программой Российской Федерации по «Развитию промышленности и повышения ее конкурентоспособности» задача совершенствования конструкций сборных фрез для обработки крупномодульных зубчатых колес, с применением режущих элементов из инструментальных твердых сплавов (ИТС), для существенного повышения работоспо-

собности и производительности является актуальной на сегодняшний день.

Материалы и методы

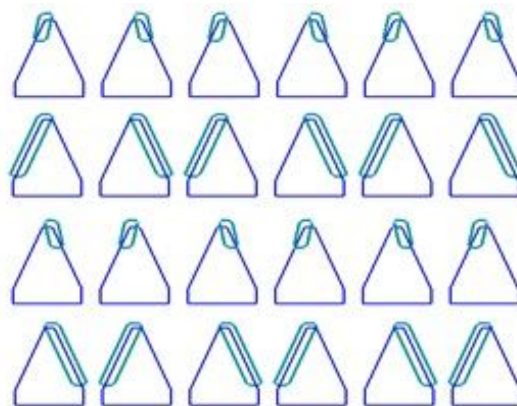
В поисках решений и методов по созданию принципиально нового инструмента [18, 19, 20], с целью поиска оптимального способа крепления режущих пластин, модификации инструмента и снижения нагрузок в процессе обработки заслуживают внимания результаты исследований [21].

Исследования показывают то, что влияние толщины пластины на напряженное состояние более значимо, чем ее длина. Однако не следует забывать об экономической составляющей и высокой стоимости инструментального твердого сплава, из которого изготавливаются сменные режущие пластины. Следовательно, увеличение толщины при радиальном расположении пластины не все-

гда оправданно. Поэтому при создании сборной фрезы для обработки зубчатых колес, по нашему мнению, целесообразно применять тангенциальное расположение режущих пластин в корпусе инструмента. Данный метод позволяет сэкономить использование инструментального твердого сплава, обеспечить стабильность позиционирования сменных режущих пластин (СРТП) в корпусе инструмента, улучшить выход стружки из зоны обработки, обеспечить свободный доступ при поломке к крепежным винтам при замене режущих пластин. На рис.1а показана реализация прогрессивной схемы резания путем деления припуска на обработку при зубофрезеровании путем тангенциального расположения СРТП в корпусе инструмента и профили инструментальных реек при тангенциальном расположении СРТП (рис.1б).



а)



б)

Рис. 1. Тангенциальное расположение СРТП в корпусе инструмента

Fig. 1. The tangential location of the RCHAP in the tool body

В результате проведенного имитационного моделирования процесса механической обработки цилиндрического

зубчатого колеса были получены графики изменения поперечного сечения срезаемого слоя для стандартной чер-

вячной фрезы (рис.2а) и с тангенциально расположенными элементами (рис.2б). Разработанная схема позволяет разделить стружку на части, облегчить ее

сход из зоны резания и значительно снизить нагрузку на режущие кромки зуба, и снизить силы резания.

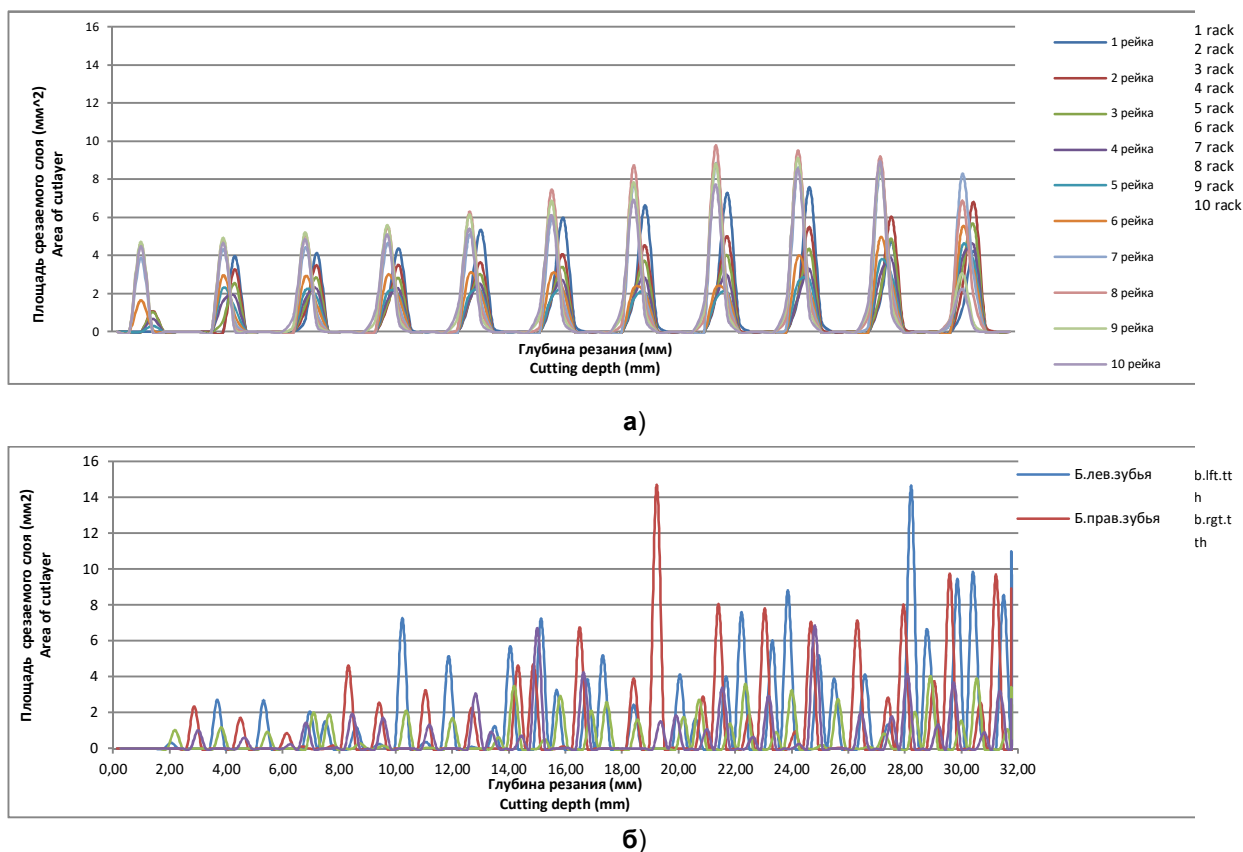


Рис. 2. График зависимости площадей поперечного сечения срезаемого слоя:

а – для стандартной червячной фрезы; **б** – при тангенциальном расположении СРТП

Fig. 2. Graph of the dependence of the cross-sectional area of the cut layer: **a** – for a standard hob cutter; **b** – with the tangential arrangement of the RCHAP

С применением программного обеспечения Компас 3D, была спроектирована сборная червячная фреза $m=14$ для об-

работки цилиндрических зубчатых колес с тангенциальным расположением СРТП (рис.3).

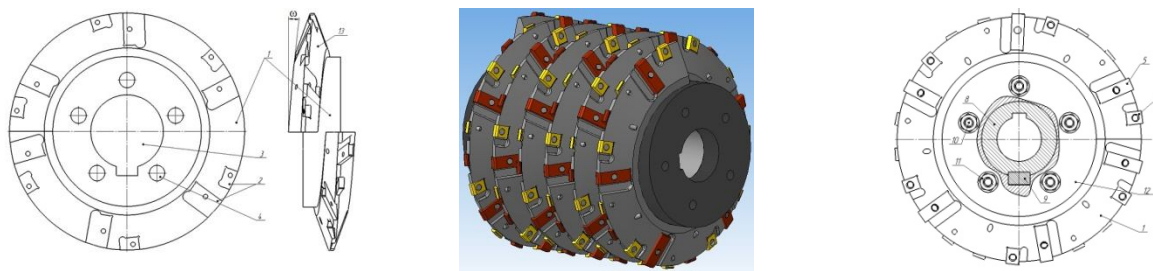


Рис. 3. Конструкция сборной червячной фрезы с СРТП

Fig. 3. Design of a prefabricated worm cutter with RCHAP

Результаты и их обсуждение

Результатом исследований стало создание конструкции сборной червячной фрезы, которая состоит из отдельных дисков, корпус которых образует винтовую поверхность, которая имеет определенный угол подъема ω , имеющих тангенциальные пазы с опорными поверхностями для расположения в них режущих элементов, отверстие для расположения втулки со шпоночным пазом и пять сквозных отверстий для шпилек. На каждом диске закреплены основные и боковые режущие пластины, базирующиеся в угловых пазах при помощи винтов. Для исключения возможности проворота дисков корпуса фрезы во время фрезерования инструмент оснащен втулкой и призматической шпонкой со шпоночным пазом. Диски собираются на втулке и шпонке и стягиваются пятью шпильками, на концах которых имеются гайки. По краям корпуса имеются две дисковые щеки для наилучшего закрепления дисков сборной червячной фрезы. Данный метод

позволяет сэкономить использование инструментального твердого сплава, обеспечить стабильность позиционирования СРТП в корпусе инструмента, улучшить сход стружки из зоны резания, обеспечить легкий доступ при поломке к крепежным винтам при замене режущих пластин [22].

Однако дальнейший анализ полученных результатов имитационного моделирования выявил незначительную неравномерность загрузки боковых, тангенциально расположенных пластин. Причиной данного явления может служить образование площадей поперечного сечения срезаемого слоя сложной формы (рис.4), в процессе обработки зубчатого колеса с прямолинейными и криволинейными участками. Данный вид стружки оказывает на сменную твердосплавную пластину негативное влияние в точках перехода с одного участка на другой и способствует возникновению концентраторов напряжений в процессе механической обработки (рис. 5).

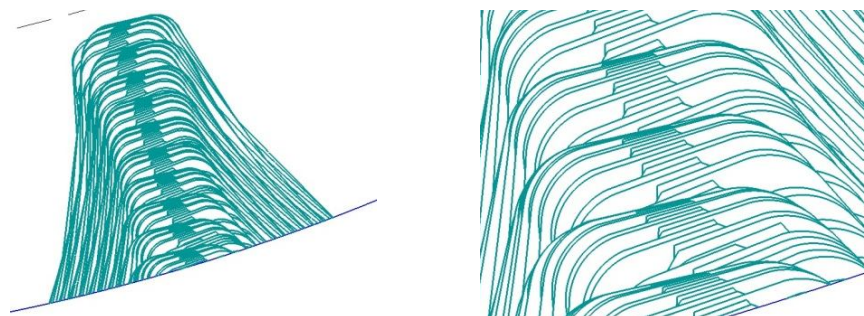
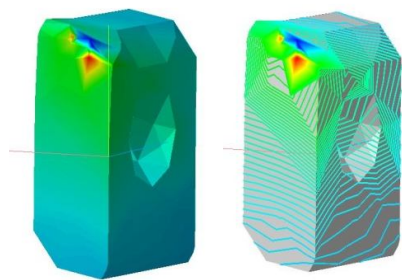
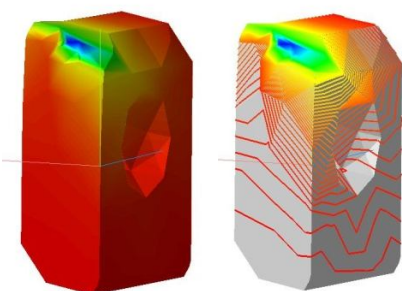


Рис. 4. Срезаемые слои сложной формы

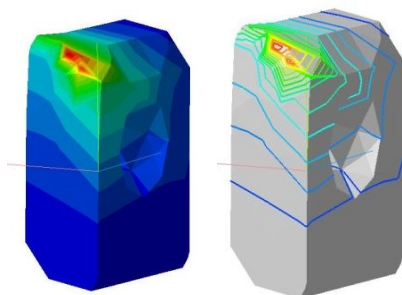
Fig. 4. Cut layers of complex shape



Поля и изолинии главных напряжений σ_1
(Fields and isolines of the main stresses σ_1)



Поля и изолинии главных напряжений σ_3
(Fields and isolines of the main stresses σ_3)



Поля и изолинии эквивалентных напряжений
(Fields and isolines of equivalent stresses)

Рис. 5. Распределение главных напряжений σ_1 и σ_3 в процессе обработки зубчатого колеса фрезой

Fig. 5. Distribution of the main stresses σ_1 and σ_3 during the processing of the gear wheel with a mill

Поэтому для снижения и частично-го исключения возникновения опасных

напряжений σ_1 и σ_3 рекомендуется применять измененную схему расположением сменных твердосплавных режущих пластин, позволяющую исключить возможность возникновения при реальной обработке сложной стружки с прямолинейными и криволинейными участками одновременно. На рис. 6а показана реализация расположения режущих пластин с внедрением эллипсной пластины при тангенциальном расположении СРТП с измененной геометрией (рис.6б).

Результат имитационного моделирования подтвердил правильный выбор геометрии сменных режущих пластин и реализации расположения режущих элементов в корпусе режущего инструмента. С применением данной схемы удалось добиться более равномерного деления припуска на обработку и исключить возникновение стружки с прямолинейными и криволинейными участками одновременно при обработке крупномодульных зубчатых колес (рис.7).

Графики изменения площадей поперечного сечения срезаемых слоев для данного расположения режущих пластин показали равномерность загрузки режущих элементов из инструментального твердого сплава (рис.8).

В Тюменской области и других нефтегазодобывающих регионах в большом количестве крупномодульные зубчатые колеса используются в редукторах типа Ц2НШ (рис.9) для нефтяных и газовых качалок (рис.10).

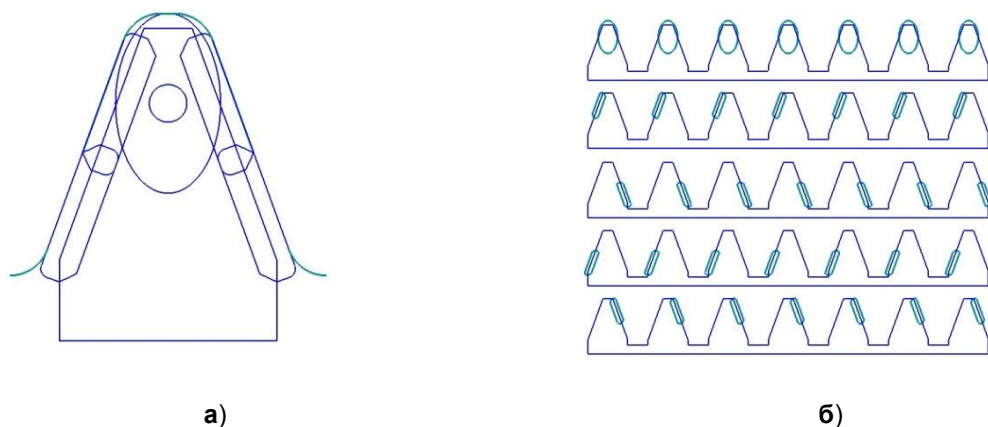


Рис. 6. Расположение режущих пластин в корпусе сборной червячной фрезы с применением эллипсной пластины

Fig. 6. Location of cutting inserts in the body of a prefabricated worm cutter using an ellipse plate

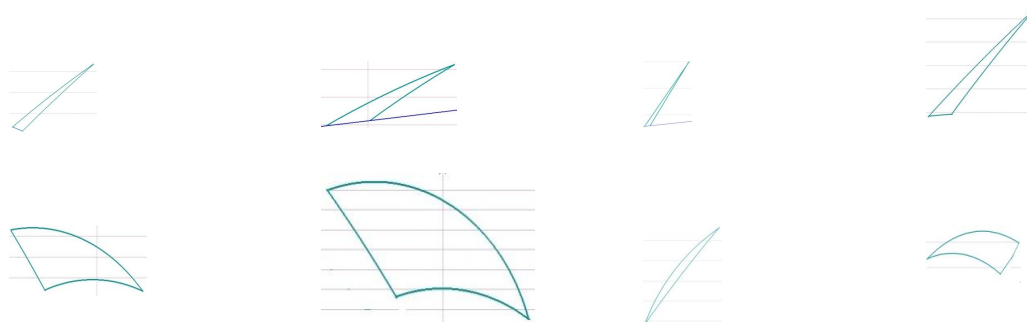


Рис. 7. Фрагменты видов площадей поперечного сечения среза при работе сборной фрезы

Fig. 7. Fragments of views of the cross-sectional area of the slice during operation of the combined cutter

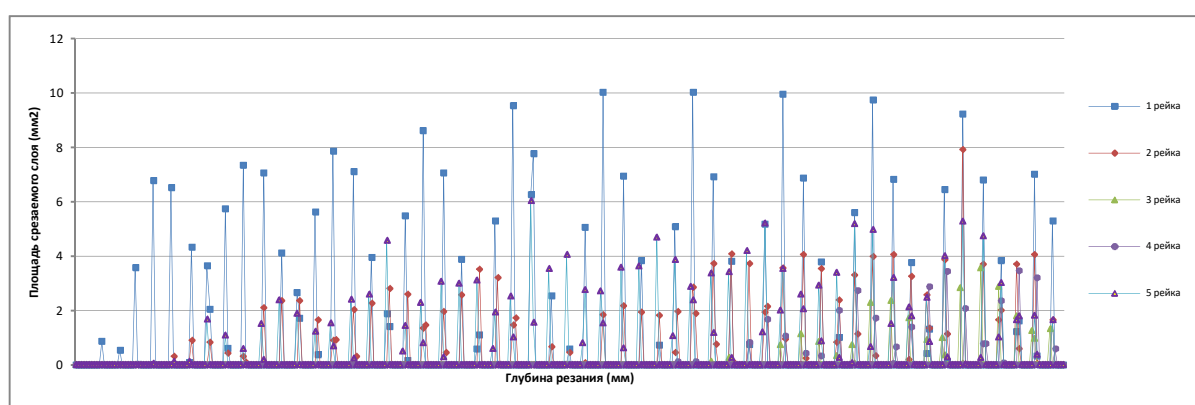


Рис. 8. График зависимости площадей поперечного сечения срезаемого слоя при тангенциальном расположении СРТП

Fig. 8. Graph of the dependence of the cross-sectional area of the cut layer with the tangential arrangement of the RCHAP

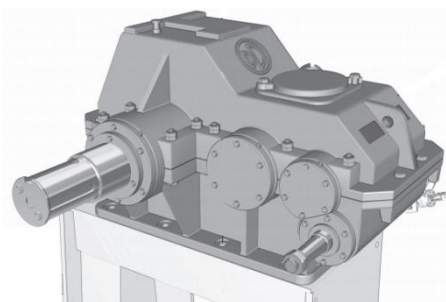


Рис. 9. Редуктор Ц2НШ

Fig. 9. Reducer Ц2НШ



Рис. 10. Нефтяная качалка

Fig. 10. Oil pumping

В связи с постоянным увеличением объемов добычи углеводородных ресурсов и увеличением количества месторождений потребность в новом оборудовании возрастает. Соответственно возрастает потребность в изготовлении крупномодульных зубчатых колес для новых редукторов и ремонта уже эксплуатируемых на месторождениях.

Выводы

В результате проведенных исследований было доказано, что применение тангенциального расположения режущих элементов в конструкциях сборных червячных фрез способствует снижению износа инструмента путем последовательного срезания припуска на обработку отдельными режущими твердосплавными пластинами, расположен-

ными на инструментальном червяке. В результате обеспечивается получение стружки более простой формы, что способствует снижению главных напряжений растяжений и возникающих сил резания. Расположение большего количества режущих твердосплавных элементов на инструментальном червяке с увеличением режимов обработки по сравнению со стандартными червячными фрезами приводит к снижению величины подачи на зуб инструмента и увеличению срока службы, а также снижению величин износа и вероятности разрушения режущих элементов. Все вышесказанное позволит повысить эффективность механической обработки зубчатых колес путем увеличения производительности обработки в 3-4 раза.

Список литературы

1. Башкиров В.Н. Экспериментальное исследование динамики процесса зубофрезерования крупномодульными червячными фрезами // Станки и инструмент. 1984. № 12. С. 18-20.

2. Напряженно-деформированное состояние и прочность режущих элементов инструментов / Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, Н.И. Смолин, М.Х. Утешев. М.: Недра, 2001. 199 с. ISBN 5-8365-0093-2
3. W. Liu, D. Ren, S. Usui, J. Wadell, T. D. Marusich, A gear cutting predictive model using the finite element method // J. CIRP. 2013. 8. P. 51-56.
4. Egorov S.B., Kapitanov A.V., Loktev D.A. Modern Methods and Technological Solutions for Effective Processing of Gear Wheels // Materials Science Forum. 2016. Vol. 870, pp. 397-403, Trans Tech Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397
5. The Selection of the optimum process of machining gear teeth / V.I. Ruban, A.Z. Gojayev, V.M. Ruban, S.D. Zaitsev // Journal of mechanical engineering. 2008. № 7. P. 40-41.
6. Artamonov E. V., Kireev V. V. The Compound Hob For Processing Gearbox Pinions Used In Hoist For Well Repairs // Appl. Mech. Mater. 2015. № 770. P. 469-475.
7. Gear hobbing: A contribution to analogy testing and its wear mechanisms / S. Steina, M. Lechthalera, S. Krassnitzera, K. Albrechta, A. Schindlerb, M. Arndta // J. CIRP. 2012. N1(1). P. 220-225.
8. Processing of gears: improving productivity and quality / N. Kurochkin, B.M. Solonitsyn, O.V. Taratynov, V.V. Klepikov // Truck. 2005. N3. P. 28-31.
9. Kanatnikov N.In., Kharlamov G.A. Improving the efficiency of processing of straight-toothed bevel gears // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2015. N 3. P. 8-16.
10. Papsheva N.D., Akushskaya O.M. Improving the efficiency of the process of gear cutting // Engineering Journal of Don. 2015. N 36. 54 p.
11. Tokawa T., Y Nishimura., Nakamura Y. High productivity dry hobbing system // J. Mitsubishi Heavy Ind. 2001. N 38(1). P. 27-31.
12. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента. Тбилиси, 1973. 304 с.
13. Ткемиладзе Г.Н., Тотчиев Ф.Г., Лоладзе Т.Н. Исследование напряжений в режущей части инструмента при переходных процессах методом фотоупругости // Сообщ. А.Н. Грузинской ССР. 1975. №3.
14. Медведицков С.Н., Нарожных А.Т., Чурбаков В.Ф. Толщина срезаемого слоя при нарезании зубчатых колес червячно-модульными фрезами // Технология машиностроения. Труды Волгоградского политех. института. Волгоград, 1971. С. 245-252.
15. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. М.: Машиностроение, 1981. 104 с.
16. Artamonov E. V., Kireev V. V., Zyryanov V. A., Improving the Efficiency of Hobbing Mills // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. No. 5. P. 447-449. Allerton Press, Inc., 2017. DOI: 10.3103/S1068798X17050057

17. Artamonov E. V., Kireev V. V. Effectiveness of cutting by hods with replaceable hard-alloy plates // J. Russ. Eng. Res. 2014. N 37(7). P. 473-474.
18. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Утешев М.Х. Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 152 с. ISBN 978-5-99-61-0453-6
19. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов / Е.В. Артамонов, Т.Е. Помигалова, А.М. Тверяков, М.Х. Утешев. Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. 148 с. ISBN 978-5-9961-0652-3
20. Современные технологические подходы при изготовлении цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента / В.П. Балков, Л.И. Каменецкий, А.С. Кирютин, Е.А. Негинский, О.С. Отт, Д.Н. Пищулин // Металлообработка. 2015. № 4(88). С. 2-6.
21. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. 192 с. ISBN 5-88465-416-2
22. Пат. 2680122 Российская Федерация, МПК В23F21/16. Сборная червячная фреза / Артамонов Е. В., Киреев В. В., Зырянов В. А.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ). заявл. 28.12.2017; опубли. 15.02.2019. Текст: непосредственный

References

1. Bashkirov V.N. Eksperimental'noe issledovanie dinamiki protsessa zubofrezzerovaniya krupnomodul'nymi chervyachnymi frezami [Experimental Study of the Dynamics of Tooth Cutting Process by Large-Module Worm Mills]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1984, no. 12, pp. 18-20 (In Russ.).
2. Artamonov E.V., Ephimovich I.A., Smolin N.I., Uteshev M. H. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i prochnost' rezhushchikh elementov instrumentov* [Stress strain condition and durability of tools cutting elements]. Moscow, Nedra Publ., 2001, 199 p. (In Russ.).
3. Liu W., Ren D., Usui S., Wadell J., Marusich T. D. A gear cutting predictive model using the finite element method. *J. CIRP*. 2013, no. 8, pp. 51-56.
4. Egorov S.B., Kapitanov A.V., Loktev D.A.. Modern Methods and Technological Solutions for Effective Processing of Gear Wheels. *Materials Science Forum*, 2016, vol.870, pp. 397-403, 2016 Trans Tech Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397.

5. Ruban V.I., Gojayev A.Z., Ruban V.M., Zaitsev S.D. The Selection of the optimum process of machining gear teeth. *Journal of mechanical engineering*, 2008., no. 7, pp. 40-41.
6. Artamonov E. V., Kireev V. V. The Compound Hob For Processing Gearbox Pinions Used In Hoist For Well Repairs, *Appl. Mech. Mater.*, 2015, 770, pp. 469-475.
7. Steina S., Lechthalera M., Krassnitzera S., Albrechta K., Schindlerb A., Arndta M., Gear hobbing: A contribution to analogy testing and its wear mechanisms. *J. CIRP*, 2012, no. 1(1), pp. 220-225.
8. Kurochkin N., Solonitsyn B.M., Taratynov O.V., Klepikov V.V. Processing of gears: improving productivity and quality. *Truck*, 2005, no. 3, pp. 28-31.
9. Kanatnikov N.In., Kharlamov G.A. Improving the efficiency of processing of straight-toothed bevel gears. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2015, no. 3, pp. 8-16.
10. Papsheva N.D., Akushskaya O.M. Improving the efficiency of the process of gear cutting. *Engineering Journal of Don*. 2015, no. 36, 54 p.
11. Tokawa T., Nishimura Y., Nakamura Y. High productivity dry hobbing system. *J. Mitsubishi Heavy Ind*, 2001, no. 38(1), pp. 27-31.
12. Betaneli A.I. *Prochnost' i nadezhnost' rezhushchego instrumenta* [Strength and reliability of cutting tool]. Tbilisi, 1973, 304 p. (In Russ.).
13. Tkemiladze G. N., Totchiev F.G., Loladze T. N. Issledovanie napryazhenii v rezhushchei chasti instrumenta pri perekhodnykh protsessakh metodom fotouprugosti [Study of stresses in the cutting part of the tool during transient processes by photoelastic method]. *Soobshch. A.N. Gruzinskoi SSR = Mg. A.N. Georgian SSR*. 1975. no. 3. (In Russ.).
14. Medvedev S.N., Narozhny A.T., Churbakov V.F. [Thickness of cut layer at cutting of gear wheels by worm-modular mills]. *Tekhnologiya mashinostroeniya. Trudy Volgogradskogo politekh. instituta* [Technology of mechanical engineering. Works of the Volgograd Polytechnic Institute]. Volgograd, 1971, pp. 245-252 (In Russ.).
15. Medvedickov S.N. *Vysokoproizvoditel'noe zubonarezanie frezami* [High-performance gear cutting by mills]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 106 p. (In Russ.).
16. Artamonov E. V., Kireev V. V., Zyryanov V. A. Improving the Efficiency of Hobbing Mills. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 5, pp. 447–449. Allerton Press, Inc., 2017. DOI: 10.3103/S1068798X17050057.
17. Artamonov E. V., Kireev V. V. Effectiveness of cutting by hods with replaceable hard-alloy plates. *J. Russ. Eng. Res*, 2014, no. 37(7), pp. 473-474.
18. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Uteshev M.H. *Raschet i proektirovanie smennykh rezhushchikh plastin i sbornykh instrumentov* [Calculation and designing of retrofittable indexible inserts and assembly tools]. Tyumen, TSOGU Publ., 2011, 152 p. (In Russ.).
19. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Tveryakov A. M., Uteshev M.H. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' smennykh rezhushchikh plastin iz tverdykh splavov* [Failure me-

chanics and durability of retrofittable indexable inserts made of hard alloys]. Tyumen, TSOGU Publ., 2013, 148 p. (In Russ.).

20. Balkov V.P., Kamenetskii L.I., Kiryutin A.S., Neginsky E.A., Ott O.S., Pishchulin D.N. *Sovremennye tekhnologicheskie podkhody pri izgotovlenii tsilindricheskikh zubchatykh koles v usloviyakh melkoseriinogo proizvodstva i osobennosti rascheta i proektirovaniya zuboreznogo instrumenta* [Up to date approaches for technology of small lot cylindrical gears production and special features of gear cutting tool computing and design engineering]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2015, no. 4(88), pp. 2-6 (In Russ.).

21. Artamonov E.V. *Prochnost' i rabotosposobnost' smennykh tverdospлавnykh plastin sbornykh rezhushchikh instrumentov* [Durability and operability of replaceable hard-alloy plates of the combined cutting tools]. Tyumen, TGNGU Publ., 2003, 192 p. (In Russ.).

22. Artamonov E. V., Kireev V. V., Zyryanov V. A. *Sbornaya chervyachnaya freza* [Combined worm mill]. Patent RF, no. 2680122, 2017 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Артамонов Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станки и инструменты», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: artamonovev@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Evgeny V. Artamonov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Machines and Tools Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, e-mail: artamonovev@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>,

Киреев Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станки и инструменты», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация, , e-mail: kireevvv@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-1036>

Vitaly V. Kireev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machines and Tools Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, e-mail: kireevvv@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-1036>,

Зырянов Виталий Андреевич, аспирант кафедры «Станки и инструменты», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: zyrjanovva@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8191-3930>,

Vitaly A. Zyryanov, Post-Graduate Student, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, e-mail: zyrjanovva@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8191-3930>,

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-52-67>

Разработка технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования

А. В. Кузовкин¹, А. П. Суворов¹, Д. Е. Крохин¹, В. В. Куц² ✉

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Московский пр. 14, г. Воронеж 394026, Российская Федерация

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

✉ e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Создание методологии, позволяющей проектировать электроды-инструменты (ЭИ) при использовании передовых систем автоматизированного проектирования (САПР), путем формирования рабочей поверхности инструмента с геометрией, обратноточностной геометрией заданной детали при учете величины межэлектродного зазора (МЭЗ), рабочего поступательного или поступательно-вращательного движения ЭИ, величины слоя токопроводящего покрытия исходя из технологических параметров процесса обработки. Так же необходимо предложить, внедрить и сформировать технологические рекомендации применительно к процессу производства ЭИ из диэлектрических материалов аддитивными методами с последующим формированием на них токопроводящего слоя, величина которого должна обеспечить протекание рабочих электрических процессов в межэлектродном зазоре и необходимую стойкость инструмента. Это даст возможность расширить сферу применения комбинированных ЭИ применительно к комбинированным методам обработки, которым свойственны широкое разнообразие форм рабочей поверхности, соответствующей геометрии обрабатываемой заготовки, не ограниченной величиной степени кривизны, на порядок более низкой себестоимостью и высоким показателем технологичности при создании специального инструмента для опытного и единичного производства.

Методы. При выполнении работы были использованы теоретические положения классических закономерностей в области технологии машиностроения, электрических методов обработки, известные закономерности быстрого прототипирования и аддитивных технологий.

Результаты. Разработаны теоретические основы и технология изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования и предложена методика по расчету и проектированию рабочей части ЭИ, учитывающая геометрические параметры обрабатываемой поверхности с учетом изменяемой величины МЭЗ.

Заключение. Обоснован механизм проектирования электрода-инструмента средствами цифрового прототипирования в современных САД-системах с учетом особенностей геометрии детали, межэлектродного зазора и материала металлизации.

Ключевые слова: аддитивные технологии; электрод-инструмент; электроэрозионная обработка; проектирование; машиностроение.

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

© Кузовкин А. В., Суворов А. П., Крохин Д. Е., Куц В. В., 2020

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта РФФИ в рамках научного проекта №19-38-50076.

Для цитирования: Разработка технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования / А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, Д. Е. Крохин, В. В. Куц // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 52-67. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-52-67>.

Поступила в редакцию 29.11.2019

Подписана в печать 22.12.2019

Опубликована 21.02.2020

Development of the Technology for Manufacturing a Combination EDM Electrode by Rapid Prototyping

Aleksey V. Kuzovkin ¹, Alexander P. Suvorov ¹, Dmitriy Y. Krokhin ¹,
Vadim V. Kuts ² ✉

¹ Voronezh State Technical University
14 Moskovskiy av., Voronezh 394026, Russian Federation

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

✉ e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a methodology that allows designing EDM electrodes applying advanced computer-aided design (CAD) systems by forming the tool's working surface with geometry which is inverse equidistant to the geometry of a given workpiece taking into account the EDM gap, working translation or translation-rotational motion of EDM electrodes, the value of the layer of conductive coating based on the technological parameters of the processing procedure. It is also necessary to propose, implement and formulate technological guidelines for manufacturing EDM electrodes from dielectric materials by additive techniques with the subsequent formation of a conductive layer on them; the value of the layer should ensure the flow of working electrical processes in the EDM gap and the necessary tool life. This will make it possible to expand the scope of application of combination EDM electrodes as applied to combined processing techniques which are characterized by a wide variety of working surface shapes, which correspond to the geometry of the workpiece, which is not limited by the degree of curvature, has by far lower cost and high processability when creating a special tool for pilot and single manufacturing.

Methods. When carrying out the work, theory of the classical laws of mechanical engineering technology, electrical processing techniques, the known laws of rapid prototyping and additive technologies were used.

Results. The theoretical foundations and the technology for manufacturing combination EDM electrodes by rapid prototyping have been developed and a methodology for calculating and designing the working part of EDM electrodes has been proposed taking into account the geometric parameters of the machined surface and a variable EDM gap value.

Conclusion. The mechanism of EDM electrode design by means of digital prototyping in modern CAD systems is justified taking into account the features of the workpiece geometry, EDM gap and metallization material.

Keywords: additive technology; EDM electrode; EDM process; designing; machine building.

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

Funding: The study was supported by the Grant of RFFI №19-38-50076.

For citation: Kuzovkin A. V., Suvorov A. P., Krokhin D. Y., Kuts V. V. Development of the Technology for Manufacturing a Combination EDM Electrode by Rapid Prototyping. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 52-67 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-52-67>.

Received 29.11.2019

Accepted 22.12.2019

Published 21.02.2020

Введение

Для разрабатываемых в настоящее время изделий в области машиностроения характерна все возрастающая сложность, заключающаяся в увеличении числа сборочных единиц и узлов, состоящих из деталей с широкой номенклатурой типоразмеров, прочностных и массогабаритных характеристик, эргономических и эстетических факторов.

Формообразование деталей со сложной геометрией, к которой можно отнести, например, криволинейные или некруглые отверстия, отверстия и пазы очень маленьких размеров и т.д., традиционными технологиями механообработки может вызывать значительные затруднения, связанные с необходимостью программирования сложных траекторий подачи режущего инструмента, покупки или изготовления специальных средств технологического оснащения, что значительно повышает трудоемкость и себестоимость продукции в машиностроении.

Материалы и методы

Для решения вышеуказанной технологической проблемы высокую эффективность показало использование электрофизикохимических и комбиниро-

ванных технологий, основанных на достаточно хорошо исследованных к настоящему времени электрохимической и электроэрозионной обработке профильным электродом – инструментом. Формообразование геометрии заданной детали происходит путем копирования профиля фасонного электрода инструмента, который, как правило, обратноточечно обрабатываемой поверхности. При этом для электрода характерно простое поступательное или вращательное движение, что позволяет значительно снизить сложность применяемого оборудования и оснастки.

Таким образом, достоинством комбинированных электрофизикохимических методов является более широкая сфера их применения, которую можно обеспечить лишь при решении проблемы изготовления электродов-инструментов широкой номенклатуры, характеризующихся высокой точностью и невысокой себестоимостью. В настоящее время, при использовании традиционных технологий изготовления электродов-инструментов (например, механообработка) затраты трудовых и финансовых ресурсов еще достаточно велики и, в ряде случаев, превышают стоимость аналогичного инструмента для обработки резанием. Таким образом, при наличии

эффективных, апробированных во всем мире электрофизикохимических технологий до сих пор не устранен фактор, снижающий их эффективность – сложность создания точного, стойкого электрода-инструмента, обладающего низкой себестоимостью. Особенно это актуально в случае применения вышеуказанных технологий в мелкосерийном, единичном и гибком производстве в машиностроении и аэрокосмической промышленности [1-5].

Преодоление вышеуказанной проблемы может стать возможным при реализации комплексного подхода, состоящего из следующих этапов:

- разработка методологии для проектирования электродов-инструментов с использованием передовых систем автоматизированного проектирования, путем формирования рабочей поверхности инструмента с геометрией, обратноравноудаленной геометрией заданной детали при учете величины межэлектродного зазора, рабочего простого поступательного или поступательно-вращательного движения инструмента, величины токопроводящего покрытия исходя из технологических параметров процесса обработки и т.д.;

- предложить, внедрить и сформировать технологические рекомендации применительно к процессу производства ЭИ из диэлектрических материалов аддитивными методами с последующим формированием на них токопроводящего слоя, величина которого должна обеспечить протекание рабочих элект-

рических процессов в межэлектродном зазоре и необходимую стойкость инструмента.

Это даст возможность расширить сферу применения комбинированных ЭИ применительно к комбинированным методам обработки, которым свойственны широкое разнообразие форм рабочей поверхности, соответствующей геометрии обрабатываемой заготовки, не ограниченной величиной степени кривизны, на порядок более низкой себестоимостью и высоким показателем технологичности при создании специального инструмента для опытного и единичного производства.

Результаты и их обсуждение

В ходе теоретических исследований авторами сформулированы математические зависимости для расчета геометрических размеров математически рационального профиля ЭИ. В основу этих зависимостей положены фундаментальные понятия теории электрических методов обработки – это величина межэлектродного зазора и ее зависимость от технологических режимов (вид обработки, электрические параметры, обрабатываемого материала и т.д.) Ясно, что все это многообразие технологических параметров вызывает необходимость адаптации ранее полученных зависимостей применительно к конкретным условиям [6-12].

Рассмотрим процесс корректировки прошивания отверстий как одного из самых изученных приемов электрооб-

работки. На рис. 1 представлены схемы формирования МЭЗ прошивания сквозных и глухих отверстий.

Из теории электроэрозионной обработки известно, что формирование боковых и торцевых зазоров зависит от таких параметров, как энергия электрических импульсов, среднее значение силы тока, частоты следования импуль-

сов, расхода рабочей жидкости, подаваемой через межэлектродный промежуток, а так же размеров зоны обработки.

При заданном технологическом режиме обработки величины межэлектродных зазоров a_r и a_b увеличиваются при уменьшении жидкости при прокачке, и достигают максимальных значений, если движения рабочей жидкости нет.

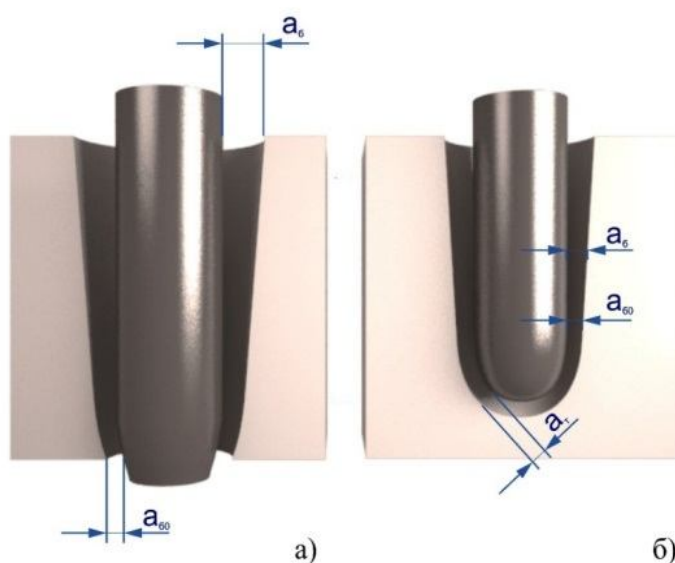


Рис. 1. Варианты формирования межэлектродного зазора при изготовлении глухих и сквозных отверстий

Fig. 1. EDM gap kinds when flashing blind and through holes

Различие значений a_r и a_b необходимо учитывать, когда рассчитывают и корректируют размеры электрода-инструмента, чтобы получить требуемую точность готовой детали. Известно несколько вариантов объемного копирования (без вращательного движения), отличающихся особенностями формирования межэлектродного зазора (рис. 2). К ним относятся:

1. Обработка деталей типа «Тело вращения» (рис. 2, а). Размеры электрода-инструмента снижаются пропорциональ-

но по отношению к размерам заготовки на значение максимального зазора со стороны торца, формирующегося на входе в полость, прошиваемой детали.

2. Обработка поверхностей фасонного типа, которые образуются при сочетании наклонных и вертикальных поверхностей (рис. 2, б). В начале прошиваемой полости присутствуют не только торцевые, но и боковые зазоры. Вертикальные участки геометрии электрода-инструмента корректируются в сторону снижения эквидистантно к профилю об-

рабатываемой детали на размер соответствующих боковых зазоров. Наклонные участки соответственно корректируются на величину максимальных зазоров со стороны торцов. Данный способ формирования размеров дает возможность исключить нерациональное завышение припуска для последующей обработки.

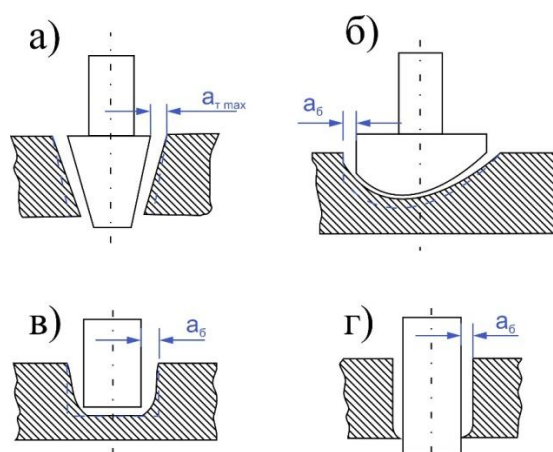


Рис. 2. Схема учета МЭЗ для коррекции размеров ЭИ

Fig. 2. The scheme of EDM gap metering for correction of EDM electrode dimensions

Все эти условия, зависящие от применяемой схемы обработки, реализованы в «Подсистеме параметризации электрода-инструмента для электроэрозионной обработки»

Авторами работы [13,14] на основе экспериментов было установлено, что минимальное значение торцевого зазора при обработке фасонных полостей приблизительно равен значению начального бокового зазора $a_{tmax}=a_{б0}$.

Таким образом подтверждена корректность ранее полученных зависимостей для комбинированного ЭИ и практических результатов, полученных авторами работ [14 и др.] для цельных ЭИ.

3. Обработка поверхностей типа щелей, пазов, отверстий (рис. 2, б, г). Размеры электрода-инструмента при проектировании уменьшают по сравнению с размерами обрабатываемой детали эквидистантно на значение максимального бокового зазора в начале обрабатываемого отверстия, щели или паза.

При построении 3D-модели комбинированного ЭИ применялся продукт Autodesk Inventor (собственно построение 3D-модели электрода-инструмента) и встроенный инструмент Plogic (технология, программирования технических характеристик непосредственно в 3D-модели). На ранней стадии проектирования инструмента создается рациональная 3D параметрическая модель, при этом обеспечивается:

- возможность для проектирования различных типоразмеров электродов - инструментов всегда оставаться в пределах рациональной геометрии;
- снижение сроков проектирования, за счет того, что в основу цифровой мо-

дели прототипа ЭИ заложена поверхность, которая обратноэквиливантна геометрии обрабатываемой поверхности;

– технология iLogic дает возможность перераспределения параметров электродов-инструментов, с одновременной корректировкой величины слоя токопроводящего покрытия при различных случаях геометрии и величины межэлектродного зазора.

Последнее утверждение реализовано с помощью созданной подсистемы [16], что позволяет инженеру-технологу:

- оперативно корректировать геометрию модели ЭИ;
- определять режимы 3D-печати в зависимости от изменения материала нетокопроводящей основы и последующего токопроводящего слоя.

Управление вышеупомянутыми параметрами на этапе конструкторской подготовки производства при создании 3D-модели готового изделия, позволяет выполнить проектирование ЭИ. При этом, правила и значения iLogic располагаются в файле 3D-модели вместе с геометрическими параметрами проектируемого ЭИ.

На основе вышеизложенных правил авторами был разработан программный модуль, предназначенный для автоматизации процесса проектирования инструментов для электроэрозионной обработки на основе цифрового прототипа заданной детали, при этом учитывались теоретические положения электрических методов обработки по расчету межэлектродного зазора и величины токопроводящего покрытия (рис. 3).

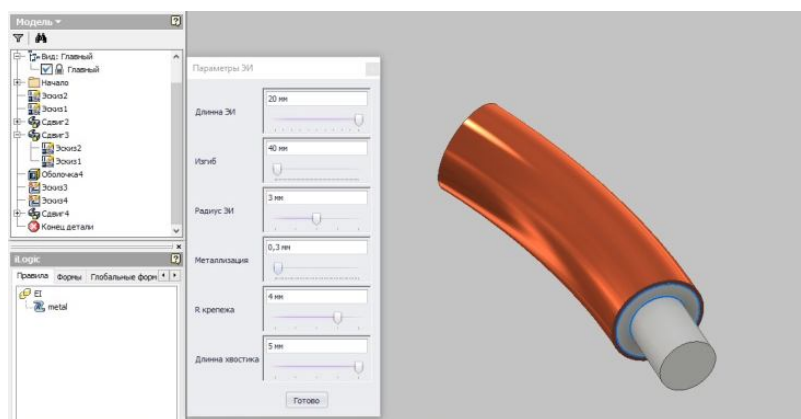


Рис. 3. Построение правил в Inventor

Fig. 3. Building rules in Inventor

В основу твердотельного прототипирования и изготовления комбинированного инструмента положена технология 3D-печати с последующим нанесением токопроводящего покрытия,

толщиной, обеспечивающей протекание процесса электрообработки.

Современные технологии 3D-печати укрупненно могут быть представлены в виде: экструзии, фотополимери-

зации, лазерного спекания, ламинирования и склеивания [17].

При использовании технологии экструзии [21] материал расплавляется и в жидком виде продавливается через сопло (одно или несколько) малого диаметра; слои адгезируют друг с другом и при охлаждении застывают, приобретая конструкционную прочность.

При фотополимеризации [21] жидкий фотополимер застывает под воздействием ультрафиолетового излучения.

Лазерное спекание характеризуется тем, что материал в виде порошка или гранул послойно наносится тонким равномерным слоем и затем спекается под действием лазера [21].

При лазерной стереолитографии, на поверхности жидкого фотополимера, засвеченные лазером микроучастки застывают и попиксельно образуют очередной слой будущего объекта. Затем происходит погружение готового слоя и формирование следующего [21].

Технология ламинирования представляет собой слои из тонких пленок, каждый из которых вырезается в форме сечения будущей детали [21]. Слои последовательно соединяются нагревом

или давлением, что создает в конечном счете готовую форму [21].

При склеивании основа в виде порошка или гранул формирует слои с помощью жидкого клея, подаваемого из сопла [21].

Для изготовления ЭИ для электрических методов обработки был выбран метод экструзии, который характеризуется:

- доступностью и низкой стоимостью оборудования;
- высокой точностью ($\pm 0,1$ мкм) получаемых объектов;
- прочностью готовых деталей (для ABS пластика $\sigma_b=22$ МПа);
- хорошей способностью к адгезии и технологической простотой нанесения токопроводящего покрытия.

В качестве материала, для печати электрической основы комбинированного ЭИ были использованы Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) и Polylactide (PLA) пластики:

ABS пластик. ударопрочен, не токсичен, не имеет запаха и химически нейтрален. Температура плавления варьируется в диапазонах от 220 до 260 °С. В промышленности применяют пластик в двух видах: нить (рис. 4) и порошок.



Рис. 4. Нить ABS пластика, используемая в исследованиях

Fig. 4. ABS plastic thread used in research

– PLA пластик – экологически чистый и безопасный материал. Температура его плавления около 190-220 °С. В промышленности PLA пластик применяется в виде нити, аналогичным, представленным на рис. 4.

Основными недостатками данного материала являются:

- разрушение под воздействием тепла и света;
- невысокая прочность при ударных нагрузках.

Так же в ходе экспериментов использовался нейлон, который по своим характеристикам близок к ABS пластику. Однако нейлон токсичен, имеет высокую температуру плавления (около 320 °С) и гигроскопичен. Последнее делает его применение невозможным для электрических методов обработки, так как обработка ведется с применением жидких технологических сред.

По данным литературы [17] известно использование в качестве сырья для 3D-печати металлического порошка. Металлический порошок легких и цветных металлов (алюминий, медь, сплавы на основе серебра и др.), как правило содержит специальные добавки, например, в виде стекловолокна или керамики.

Такой материал, обладающий токопроводящими свойствами, можно считать самым рациональным материалом для изготовления ЭИ. Его использование позволяет исключить окончательную технологическую операцию – нанесение диэлектрическую основу то-

копроводящего слоя заданной толщины. Однако применение металлических порошков в настоящее время сдерживается стоимостью оборудования для 3D-печати [17]. Следует сказать, что стоимость такого 3D-принтера сопоставима со стоимостью промышленного механообрабатывающего центра с ЧПУ [17,18].

На основе теоретических исследований авторами были выявлены факторы, оказывающие влияние на величину изменения линейных размеров объектов, а именно:

- температура печати;
- диаметр экструдера;
- вертикальная величина подачи сопла экструдера;
- температура рабочего стола;
- процент заполнения модели материалом.

Авторами экспериментальным путем были определены коэффициенты, учитывающие величину изменения линейных размеров объектов, полученных методами 3D-печати под влиянием вышеперечисленных факторов, для чего был спроектирован экспериментальный образец специальной формы (рис. 5).

Характерные значения линейных размеров представлены на рис. 6.

Анализ данных показал их сходимость на уровне 94-96 % при доверительном интервале $\pm 0,2$ мм. Что является приемлемым для использования результатов эксперимента на практике [18-20].



Рис. 5. Экспериментальный образец для определения коэффициента термоусадки, полученный при толщине нити: **а** – 0,4 мм; **б** – 0,8 мм

Fig. 5. A prototype for determining heat shrink ratio obtained when:
a – thread thickness 0,4 mm; **b** – thread thickness 0,8 mm

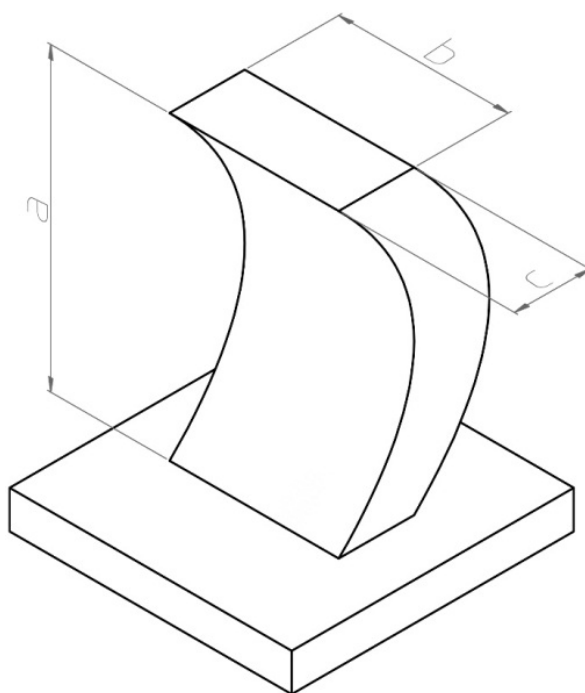


Рис. 6. Пояснение по определению коэффициента термоусадки образцов

Fig. 6. Explanation of the determination of the heat shrink ratio of the samples

Проведение эксперимента позволило предположить для промышленной апробации форму ЭИ, которая разработана для удаления заусенцев и скругле-

ния острых кромок на выходе из каналов рабочего колеса турбонасосного агрегата (ТНА) (рис. 7) и содержит рабочие поверхности с кривизной 2G и 3G (рис. 8).



Рис. 7. Рабочее колесо ТНА, послужившее прототипом для создания формы экспериментального ЭИ

Fig. 7. The impeller of the turbopump unit used as a prototype for creating the shape of the pilot of EDM electrode

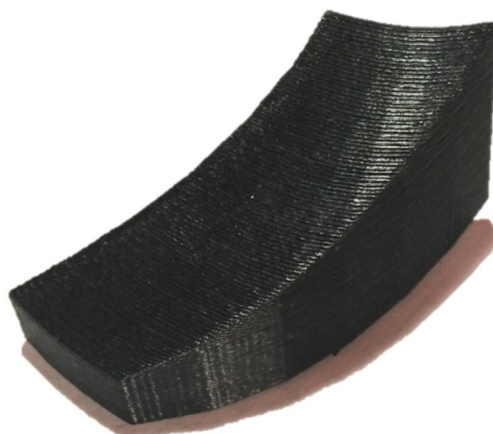


Рис. 8. Токопроводящая основа комбинированного ЭИ с рабочими поверхностями с кривизной 3G и 2G

Fig. 8. The conductive base of the combination EDM electrode with work surfaces with curvature of 3G and 2G

Выводы

Проведенные авторами работы позволили разработать автоматизированный метод расчета электродов-инструментов для электрофизикохимической обработки за счет многопараметрического генерирования средств техноло-

гического оснащения комбинированными методами быстрого прототипирования и нанесения покрытий, что позволило обеспечить заданные параметры и сравнительно низкую себестоимость процессов обработки деталей.

Список литературы

1. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – Manuf Technol, 2007, 56 (1). P. 241–244.
2. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach Int J Adv Manuf Technol, 2011, 53. P. 181–190.
3. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy // Chinese Journal of Aeronautics. February 2013. Vol. 26, is. 1. P. 224–229.
4. Burns M Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing (Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall). 1993. 369 p.
5. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M., Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. P. 319–328.
6. Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 24. P. 11832-11835.
7. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов [и др.] // СТИН. 2017. № 4. С. 24-26.
8. Errors in shaping by a planetary mechanism / V.A. Grechishnikov, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, S.Y. Yurasov // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. № 9. С. 824-826.
9. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе аддитивного формообразования изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 122-129.
10. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry // MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842
11. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming // MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842

12. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces // MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 224, 01058 (2018) DOI: 10.1051 / matecconf / 201822401058
13. Суворов А. П., Кузовкин А. В. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 9-15.
14. Суворов А. П., Кузовкин А. В. Параметрическое проектирование электрода-инструмента для электрообработки с помощью модуля ilogic // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 105-109.
15. Суворов А. П., Кузовкин А. В. Перспективы использования современных информационных технологий в обработке сложных поверхностей // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. №1. С. 83-87.
16. Vladislav P. Smolentsev, Oleg N. Fedonin, Eugene V. Smolentsev Electroerosion formation and technology of cast iron coatings on aluminum alloys // MATEC Web of Conferences. 2017. 129, 01016, DOI: 10.1051/matecconf/201712901016
17. Комбинированные методы повышения качества поверхностного слоя материалов / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов, Е.В. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. №1 (321). С. 90-97.
18. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Процесс эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т.13. № 3. С. 107-115.
19. Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник РГАТУ им. П.А Соловьева. 2017. №2. С.5-9.
20. Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Смоленцев Е.В. Станочное оборудование для прошивки с использованием электрических методов обработки // Справочник. Инженерный журнал. 2018. № 5 (254).
21. 3D-печать позволяет создавать «настольные» реакторы для производства лекарств // Кодинг и вебмастеринг для чайников. Сайт для айтишников. URL: <https://webstudio-uwk.ru/3d-pechat-pozvoljaet-sozdavat-nastolnye-reaktory/>

References

1. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – *Manuf Technol*, 2007, no.56 (1), pp. 241–244.
2. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach Int J Adv *Manuf Technol*, 2011, no.53, pp. 181–190.

3. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy. *Chinese Journal of Aeronautics*, February 2013, vol. 26, is. 1, pp. 224–229.

4. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing (Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall), 1993, 369 p.

5. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M., Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography *Computer-Aided Design & Applications*, 2005, no. 2, pp. 319–328.

6 Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-11835.

7. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Razumov M. S. and others. Opređenje pogreshnosti formy detali pri formoobrazovanii planetarnym mekhanizmom metodami geometricheskoi teorii rezaniya [Determination of the error in the shape of a part shaping by a planetary mechanism using the methods of geometric cutting theory]. *STIN= STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26 (In Rus.).

8. Grechishnikov V.A., Romanov V.B., Pivkin P.M., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Yurasov S.Y. Errors in shaping by a planetary mechanism. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.

9. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Upravlenie prostranstvennoi orientatsiei uzlov robota v protsesse additivnogo formoobrazovaniya izdelii [Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, no.4, pp. 122-129 (In Russ.).

10. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry. MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842.

11. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming. MATEC Web of Conferences. Vol. 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842.

12. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces.. MATEC Web of Conferences: International

Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 224, 01058 (2018) DOI: 10.1051 / mateconf / 201822401058.

13. Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Ispol'zovanie additivnykh tekhnologii v proizvodstve fasonnykh poverkhnostei [The use of additive technologies in the manufacture of shaped surfaces]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*. = *Bulletin of Rybinsk State Aviation Technological Academy*, 2017, no. 2, pp. 9-15 (In Russ.).

14. Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Parametricheskoe proektirovanie elektroda-instrumenta dlya elektroobrabotki s pomoshch'yu modulya ilogic [Parametric design of an electrode-tool for electric processing using a module ilogic]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2017, no. 1, pp. 105-109 (In Russ.).

15. Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Perspektivy ispol'zovaniya sovremennykh informatsionnykh tekhnologii v obrabotke slozhnykh poverkhnostei [Prospects for the use of modern information technologies in the processing of complex surfaces]. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii* = *Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*, 2016, no. 1, pp. 83-87 (In Russ.).

16. Smolentsev V. P., Fedonin O. N., Smolentsev E. V. Electroerosion formation and technology of cast iron coatings on aluminum alloys. MATEC Web of Conferences 129, 01016 (2017), DOI: 10.1051/mateconf/201712901016.

17. Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Ivanov V.V., Smolentsev E.V. Kombinirovannye metody povysheniya kachestva poverkhnostnogo sloya materialov [Combined methods for improving the quality of the surface layer of materials]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2017, no.1 (321), pp. 90-97 (In Russ.).

18. Kondratiev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. Protsess erozionno-luchevogo plazmennogo naneseniya iznosostoikikh pokrytii [The process of erosion-beam plasma deposition of wear-resistant coatings]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol.13, no. 3, pp. 107-115 (In Russ.).

19. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya kombinirovannykh metodov obrabotki [Status and development prospects of combined processing methods]. *Vestnik RGATU im. P.A Solov'eva* = *Bulletin of Rybinsk State Aviation Technological Academy*, 2017, no.2, pp. 5-9 (In Russ.).

20. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Smolentsev E.V. Stanochnoe oborudovanie dlya proshivki s ispol'zovaniem elektricheskikh metodov obrabotki [Machine tools for firmware using electrical processing methods]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* = *Handbook. Engineering Journal*, 2018, no. 5 (254), pp. 38-46 (In Russ.).

21. 3D-pechat' pozvolyaet sozdavat' «nastol'nye» reaktory dlya proizvodstva lekarstv [3D printing allows you to create "desktop" reactors for the production of medicines]. *Koding i vebmastering dlya chainikov* [Coding and webmasters for dummies. Website for it professionals]. (In Russ.). Available at: <https://webstudio-uwk.ru/3d-pechat-pozvoljaet-sozdavat-nastolnye-reaktory>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузовкин Алексей Викторович, доктор технических наук, заведующий кафедрой графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: akuzovkin@mail.ru

Aleksey V. Kuzovkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Graphics, Design and Information Technologies in Industrial Design, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: akuzovkin@mail.ru

Суворов Александр Петрович, старший преподаватель кафедры графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: alex_diz@inbox.ru

Alexander P. Suvorov, Senior Lecturer, Department of Graphics, Design and Information Technologies in Industrial Design, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: alex_diz@inbox.ru

Крохин Дмитрий Евгеньевич, аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: Krochin.1993@mail.ru

Dmitriy Y. Krokhin, Post-graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Krochin.1993@mail.ru

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-3244-1359>

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-3244-1359>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>

Исследование работы расширенного фильтра Калмана, дополненного адаптивным цифровым фильтром, для комплексирования данных системы управления мобильным роботом

П.А. Безмен¹ ✉

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

✉ e-mail: pbezmen@yahoo.com

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается исследование работы расширенного фильтра Калмана (РФК), дополненного адаптивным цифровым фильтром с целью компенсации ошибки работы РФК при выполнении комплексирования данных системы управления мобильным роботом.

Методы. Адаптивный цифровой фильтр (АЦФ) – самонастраивающийся фильтр, итеративно изменяющий свои переменные параметры для достижения оптимального желаемого значения выходных данных. РФК, дополненный АЦФ с алгоритмом адаптации NLMS, будем называть системой РФК–АЦФ или цифровым фильтром РФК+NLMS. Важной задачей является подбор числа кадров и весовых коэффициентов АЦФ, при котором достигается оптимальное качество подавления помехи и скорость сходимости алгоритма адаптации.

Результаты. При различных вариантах организации работы буферной памяти АЦФ скорректированные значения оценки состояния системы «мобильный робот–среда» могут отличаться. При малом числе кадров входных данных и весовых коэффициентов АЦФ будет наблюдаться низкое качество подавления помехи. С увеличением числа кадров и весовых коэффициентов улучшается качество подавления помехи, а скорость сходимости алгоритма адаптации уменьшается.

Заключение. Алгоритм цифрового фильтра РФК+NLMS занимает промежуточное место между алгоритмом РФК и последовательной фильтрацией сигнала РФК и АЦФ с алгоритмом NLMS по критериям оценок среднеквадратической ошибки, средней абсолютной ошибки, отношения сигнал/шум и скорости сходимости.

Ключевые слова: робототехника; мобильный робот; комплексирование данных; фильтр Калмана; адаптивный цифровой фильтр.

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

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

Для цитирования: Безмен П.А. Исследование работы расширенного фильтра Калмана, дополненного адаптивным цифровым фильтром, для комплексирования данных системы управления мобильным роботом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 68-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-6-68-89>.

Поступила в редакцию 19.12.2019

Подписана в печать 06.02.2020

Опубликована 21.02.2020

Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System

Petr A. Bezmen¹ ✉

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

✉ e-mail: pbezmen@yahoo.com

Abstract

Purpose of research. The article deals with the study of the operation of the extended Kalman filter (EKF), supplemented with an adaptive digital filter in order to compensate for the error in the operation of the EKF when performing data integration of the mobile robot control system.

Methods. The adaptive digital filter (ADF) is a self-tuning filter that iteratively changes its variable parameters to achieve the optimal desired values of the output data. The EKF supplemented with the ADF with the NLMS adaptation algorithm will be called the EKF–ADF system or the EKF+NLMS digital filter. An important task is the selection of the number of frames and ADF weighting coefficients at which the optimum quality of noise suppression and the convergence rate of the adaptation algorithm are achieved.

Results. With various options of organizing the operation of the ADF buffer memory, the adjusted values for assessing the state of the ‘mobile robot–environment’ system may differ. When the number of input data frames and ADF weighting coefficients are small, low quality noise suppression will be observed. With an increase in the number of frames and weighting coefficients, the quality of noise suppression is improved, and the convergence rate of the adaptation algorithm decreases.

Conclusion. The EKF+NLMS digital filter algorithm takes an intermediate place between the EKF algorithm and the serial filtering of the EKF and ADF signals with the NLMS algorithm according to the criteria for estimating the mean square error, mean absolute error, signal-to-noise ratio, and convergence rate.

Keywords: robotics; mobile robot; data integration; Kalman filter; adaptive digital filter.

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

Funding: The research was carried out with the support of the RFBR in the framework of scientific project no.19-38-50065.

For citation: Bezmen P. A. Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(6): 68-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>.

Received 19.12.2019

Accepted 06.02.2020

Published 21.02.2020

Введение

Задача рационального объединения и обработки информации от различных бортовых измерителей мобильных роботов [1, 2] может быть решена с помощью фильтров Калмана, например

линейного фильтра Калмана и расширенного фильтра Калмана [3].

Недостаток фильтров Калмана – предположение, что в системе «мобильный робот–среда» (далее система)

присутствует влияние гауссовского «белого» шума (характеризующегося нулевым математическим ожиданием) на её состояние, в то время как часто шум имеет более сложную структуру. Для применения фильтров Калмана необходимо достаточно полное описание модели системы. Данное требование является недостатком фильтров, применяемых в системах управления мобильными роботами в недетерминированных средах.

В работах [4, 5] предложено использование искусственной нейронной сети (ИНС) для коррекции значений элементов вектора апостериорной (обновленной) оценки состояния системы $\hat{x}(k|k)$, который является результатом работы расширенного фильтра Калмана (РФК).

Искусственная нейронная сеть в [6] определена как распределенный параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки. ИНС, такие, как многослойные нейронные сети с последовательными связями, позволяют компенсировать ошибку работы РФК, вызванную влиянием систематической ошибки измерений и/или «цветного» шума на состояние системы и влиянием разного рода нелинейностей, не учтенных в модели системы. Для коррекции вектора апостериорной оценки состояния системы $\hat{x}(k|k)$ РФК дополняется ИНС таким образом, что входными данными ИНС являются:

– разность значений соответствующих элементов векторов априорной (прогнозируемой) оценки состояния системы $\hat{x}(k|k-1)$ и апостериорной оценки состояния системы $\hat{x}(k|k)$:

$$X_{diff}(k)_f = \hat{x}(k|k-1)_f - \hat{x}(k|k)_f, \quad (1)$$

где f – индекс элементов данных векторов, $f \in [0, n)$; n – число оцениваемых состояний системы и размерность векторов $\hat{x}(k|k-1)$, $\hat{x}(k|k)$, $X_{diff}(k)$;

– значения элементов вектора $G_{fus}(k)$:

$$G_{fus}(k)_f = \sum_{q=0}^{m-1} G(k)_{f,q}, \quad (2)$$

где $G(k)$ – матрица коэффициентов усиления, оптимальных по Калману – размерность матрицы $n \times m$, m – число наблюдаемых (измеряемых) величин системы; f – индекс элементов вектора $G_{fus}(k)$ и матрицы $G(k)$ (индекс строки), $f \in [0, n)$; q – индекс элемента матрицы $G(k)$ (индекс столбца), $q \in [0, m)$.

Выходными данными рассматриваемой ИНС является вектор ошибки $E(k)$ оценки состояния системы, каждый элемент $E(k)_f$ которого – значение ошибки оценки соответствующего элемента $\hat{x}(k|k)_f$, $f \in [0, n)$. Для получения вектора $X_{out}(k)$ скорректированных значений оценки состояния системы складываются соответствующие значения элементов векторов $\hat{x}(k|k)$ и $E(k)$:

$$X_{out}(k)_f = \hat{x}(k|k)_f + E(k)_f, \quad (3)$$

где f – индекс элементов данных векторов, $f \in [0, n)$.

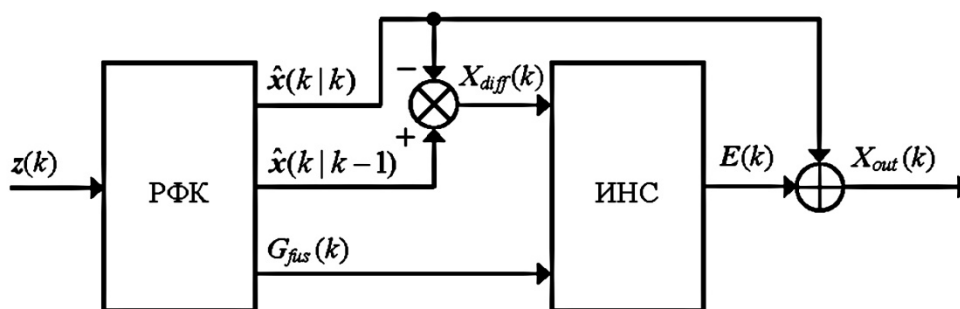


Рис. 1. Функциональная блок-схема работы системы РФК–ИНС

Fig. 1. A functional block diagram of the operation of the EKF-ANN system

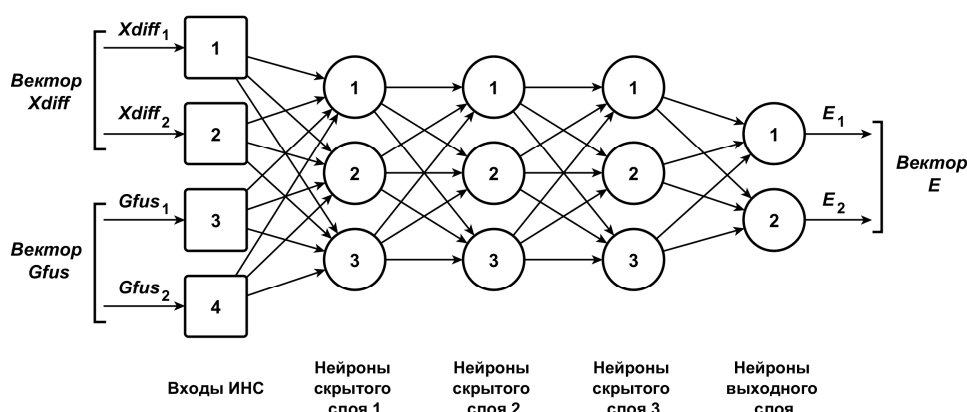


Рис. 2. Граф ИНС при размерности $n = 2$ векторов X_{diff} , G_{fus} , E

Fig. 2. ANN graph with dimension of $n = 2$ vectors X_{diff} , G_{fus} , E

РФК, дополненный ИНС таким образом, далее будем называть системой РФК–ИНС (рис. 1, 2). Размерность n векторов $\hat{x}(k|k-1)$, $\hat{x}(k|k)$, $X_{diff}(k)$, $G_{fus}(k)$, $E(k)$, $X_{out}(k)$ определяется задачей комплексирования.

Недостатком рассмотренной системы РФК–ИНС является необходимость предварительного обучения ИНС перед работой системы РФК–ИНС. Для конкретной задачи комплексирования данных существует сложность подбора множества обучающих ИНС примеров. Еще один недостаток ИНС, входящей в систему РФК–ИНС, состоит в том, что при изменении условий работы системы РФК–ИНС, так же, как и при изменении

задачи комплексирования, требуется переобучение ИНС, используя новые обучающие примеры.

Не имеющим перечисленных недостатков решением задачи компенсации ошибки работы РФК является использование адаптивных цифровых фильтров.

Материалы и методы

Адаптивный цифровой фильтр (АЦФ) – самонастраивающийся фильтр, итеративно изменяющий свои переменные параметры (весовые коэффициенты) для достижения оптимального желаемого значения выходных данных. Задача АЦФ – минимизировать разность (ошибку) между желаемыми вы-

ходными данными и фактическими выходными данными. АЦФ применяется в задачах, где спектры полезного сигнала и шума частично перекрываются. АЦФ также используется, когда полоса шумовых частот неизвестна или переменна. Составными частями АЦФ являются: цифровой фильтр с регулируемыми параметрами (весовыми коэффициентами), алгоритм адаптации, выполняющий изменение параметров цифрового фильтра (рис. 3). Существует множе-

ство применяемых алгоритмов адаптации, наиболее используемые из них: LMS (англ. *least mean squares* – алгоритм наименьших средних квадратов, авторы: Б. Уидроу, М. Хофф [7]), NLMS (англ. *normalized least mean squares* – алгоритм нормализованных наименьших средних квадратов), RLS (англ. *recursive least squares* – алгоритм рекурсивных наименьших квадратов, авторы: К. Гаусс, Р. Плакетт [8]).

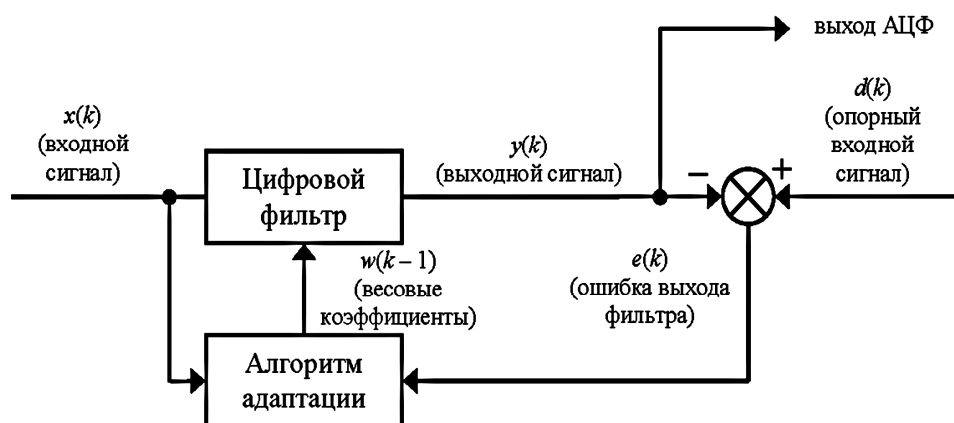


Рис. 3. Блок-схема АЦФ для фильтрации входного сигнала, где k – некоторый момент времени

Fig. 3. ADF block diagram for filtering the input signal, where k is a certain moment in time

В работе [9] приводится оценка перечисленных алгоритмов с точки зрения значений: коэффициента подавления помехи, отношения сигнал-шум, скорости сходимости алгоритма адаптации, вычислительной сложности. При равном числе N кадров входных данных, и, соответственно, весовых коэффициентов алгоритмы LMS и NLMS обладают наилучшей скоростью сходимости, что важно для применения алгоритмов адаптации в технических системах управления, работающих в реальном времени. Алгоритмы LMS и NLMS

лучше адаптируются к нестационарному шумовому сигналу, чем RLS, притом NLMS в этих условиях обладает лучшей сходимостью по сравнению с LMS и имеет схожее с ним качество подавления помехи. Алгоритм LMS показывает большую скорость сходимости при белом входном шуме, а NLMS – при розовом входном шуме, синусоидальном входном сигнале, нестационарном входном сигнале и др. Рассматриваемые немодифицированные АЦФ являются фильтрами с конечной импульсной характеристикой.

Вычислительная сложность рассмотренных алгоритмов адаптации [10, 11]:

$$\text{LMS} - \approx 2N,$$

$$\text{NLMS} - \approx 3N,$$

$$\text{RLS} - \approx 4N^2.$$

В АЦФ [12–15] кадры входного сигнала $x(k)$ и весовые коэффициенты $w(k)$ являются векторами размерностью N :

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k-1) \\ \dots \\ x_N(k-N+1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \\ \dots \\ w_N(k) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где k – некоторый текущий момент времени; $(k-1)$ – предыдущий момент времени; $(k-N+1)$ – самый ранний момент времени; $x_1(k), \dots, x_N(k-N+1)$ и $w_1(k), \dots, w_N(k)$ – элементы векторов $\mathbf{x}(k)$ и $\mathbf{w}(k)$ соответственно.

В алгоритмах LMS и NLMS ошибка выхода фильтра (сигнал ошибки) $e(k)$ в момент времени k определяется выражением:

$$e(k) = d(k) - y(k), \quad (5)$$

где $d(k)$ – опорный (требуемый) входной сигнал в момент времени k (прини-

мается, что $d(k) = x_1(k)$, $x_1(k)$ входит в $\mathbf{x}(k)$); $y(k)$ – выходной сигнал фильтра в момент времени k .

Выходной сигнал фильтра $y(k)$ находится следующим образом:

$$y(k) = \sum_{i=1}^N (w_i(k-1) \cdot x_i(k-i+1)) = \mathbf{w}^T(k-1) \cdot \mathbf{x}(k). \quad (6)$$

Весовые коэффициенты для алгоритма LMS вычисляются, используя выражение:

$$w_i(k) = w_i(k-1) + 2 \cdot \mu \cdot e(k) \cdot x_i(k-i+1), \quad (7)$$

или

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) + 2 \cdot \mu \cdot e(k) \cdot \mathbf{x}(k), \quad (8)$$

где i – индекс элементов векторов $\mathbf{x}(k)$ и $\mathbf{w}(k)$, $i \in [1, N]$; μ – шаг сходимости, определяющий устойчивость и скорость сходимости алгоритма адаптации, $\mu > 0$, чем меньше μ , тем выше устойчивость и меньше скорость сходимости.

Для алгоритма NLMS весовые коэффициенты находятся следующим образом:

$$w_i(k) = w_i(k-1) + \frac{2 \cdot \mu}{x_i(k-i+1) \cdot x_i(k-i+1) + \varepsilon} \cdot e(k) \cdot x_i(k-i+1), \quad (9)$$

или

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) + \frac{2 \cdot \mu}{\mathbf{x}^T(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \varepsilon} \cdot e(k) \cdot \mathbf{x}(k), \quad (10)$$

где ε – некоторое положительное, крайне малое число, служащее для исключения ситуаций деления на нуль.

Задача алгоритма адаптации состоит в последовательной настройке весовых коэффициентов фильтра до дости-

жения оптимального результата фильтрации сигнала, который соответствует наименьшему значению среднеквадратической ошибки (англ. *mean squared error, MSE*) J выхода фильтра или некоторой нижней точке графика зависимо-

сти среднеквадратической ошибки J от значений весовых коэффициентов w : $w_1, \dots, w_N$, где N – общее количество весовых коэффициентов (рис. 4).

Величина среднеквадратической ошибки является критерием для оценки качества и точности данных. Этот кри-

терий позволяет сравнить конкурирующие методы и системы обработки данных по результатам их работы. Значение среднеквадратической ошибки (MSE) [16–18] определим как

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i^2). \quad (11)$$

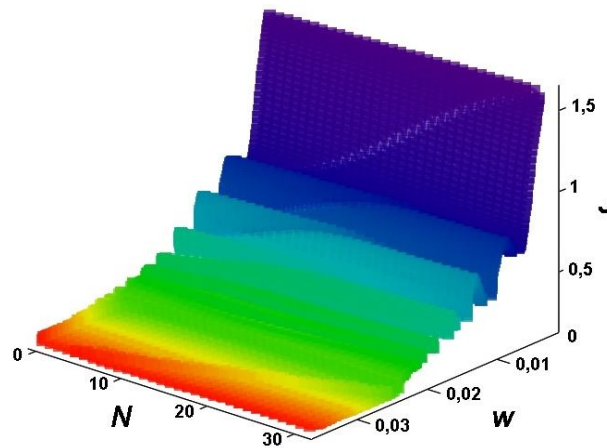


Рис. 4. График зависимости среднеквадратической ошибки J от значений весовых коэффициентов w : $w_1, \dots, w_N$

Fig. 4. The dependency graph of the standard error J on the values of the weighting coefficients w : $w_1, \dots, w_N$

График зависимости вида $J(w_1, \dots, w_N)$ (рис. 4) называют поверхностью производительности (англ. *performance surface*) [19].

Помимо среднеквадратической ошибки (MSE) часто применяются такие средства оценки результата фильтрации сигнала, как: средняя абсолютная ошибка (англ. *mean absolute error*, *MAE*) и отношение сигнал/шум (ОСШ или *SNR* от англ. *signal-to-noise ratio*), выраженное в дБ.

Величину J среднеквадратической ошибки (MSE) выразим как

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - Y_i)^2, \quad (12)$$

где S_i – значение требуемого (незашумленного) сигнала в некоторый момент

времени i ; Y_i – значение сигнала на выходе фильтра в некоторый момент времени i ,

$$N \in \mathbf{N}.$$

Значение A средней абсолютной ошибки (MAE) определим как

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - Y_i|. \quad (13)$$

Величину R отношения сигнал/шум (ОСШ) в дБ выразим как

$$R_i = 10 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{S_i}{(Y_i - S_i)} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где R_i – отношение сигнал/шум в некоторый момент времени i .

РФК, дополненный АЦФ с алгоритмом адаптации NLMS, как эффек-

тивно действующим в условиях нестационарного входного сигнала и обладающим оптимальной вычислительной сложностью по сравнению с алгоритмом адаптации RLS, будем называть системой РФК–АЦФ (рис. 5, 6).

Входными данными АЦФ в системе РФК–АЦФ являются:

- вектор $\hat{x}(k|k)$ значений апостериорной (обновленной) оценки состояния системы, подлежащих коррекции –

компенсации ошибки, вызванной в ходе работы РФК;

- вектор разности $X_{diff}(k)$ значений соответствующих элементов векторов $\hat{x}(k|k-1)$ и $\hat{x}(k|k)$ (1).

Выходными данными АЦФ и системы РФК–АЦФ является вектор $X_{out}(k)$ скорректированных значений оценки состояния системы.

Размерность n векторов $\hat{x}(k|k-1)$, $\hat{x}(k|k)$, $X_{diff}(k)$, $X_{out}(k)$ определяется задачей комплексирования.

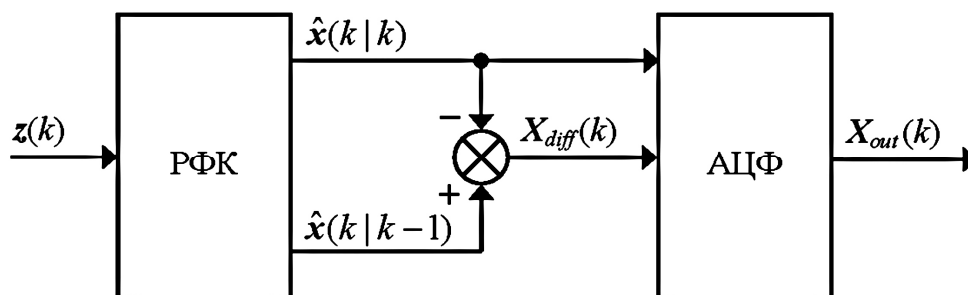


Рис. 5. Функциональная блок-схема работы системы РФК–АЦФ

Fig. 5. A functional block diagram of the operation of the EKF–ADF system

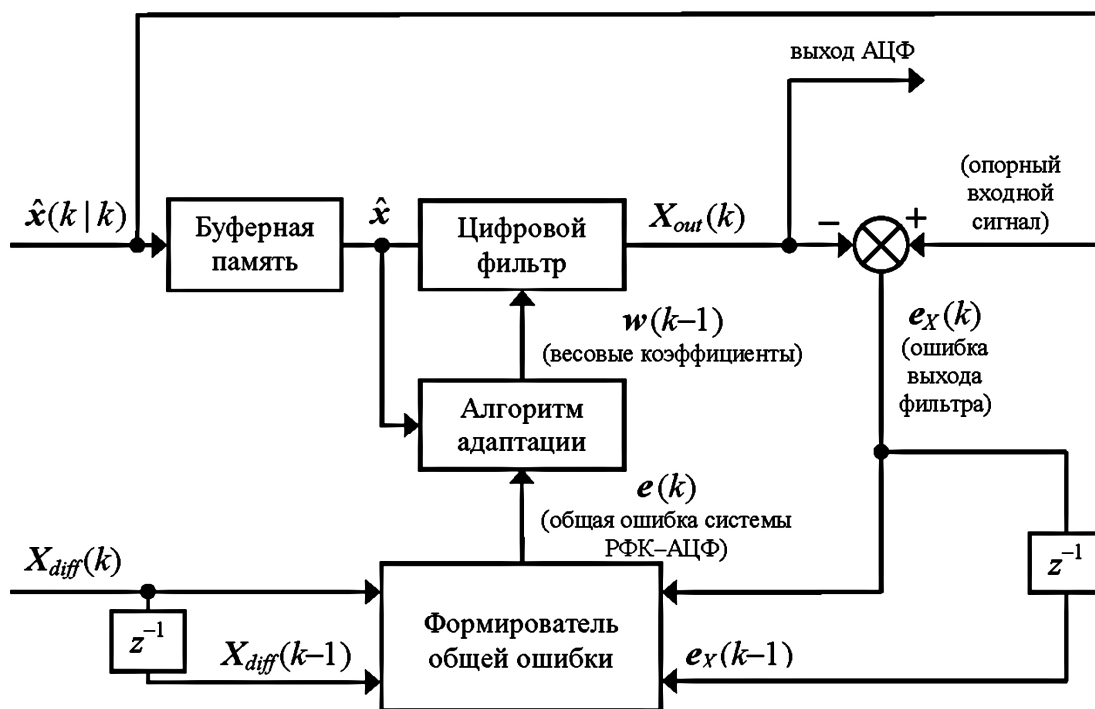


Рис. 6. Блок-схема АЦФ в системе РФК–АЦФ

Fig. 6. ADF block diagram in the EKF-ADF system

АЦФ в системе РФК–АЦФ имеет буферную память (рис. 6), предназначенную для накопления кадров входного сигнала $\hat{x}(k|k)$ в процессе работы фильтра для последующих фильтрации и последовательной настройки весовых коэффициентов. Буферная память является вектором размерностью N и повторяет структуру вектора $x(k)$ с ячейками $x_1(k), \dots, x_M(k-N+1)$ (4). В свою очередь, каждая такая ячейка повторяет структуру вектора $\hat{x}(k|k)$ размерностью n . Новый кадр входного сигнала $\hat{x}(k|k)$ помещается в первый элемент – ячейку вектора буферной памяти, причем все

хранившиеся в памяти предыдущие кадры смещаются на одну ячейку в направлении последней ячейки памяти, при этом удаляется из памяти самый «старый» кадр, располагавшийся в последней ячейке памяти. Такой принцип организации памяти получил название FIFO (англ. *first in, first out* – «первым пришёл – первым ушёл») [20]. Буферная память может обладать дополнительным разделом ячеек $d_1(k), \dots, d_M(k-M+1)$ с общим количеством ячеек M для предварительного накопления кадров входного сигнала (рис. 7).

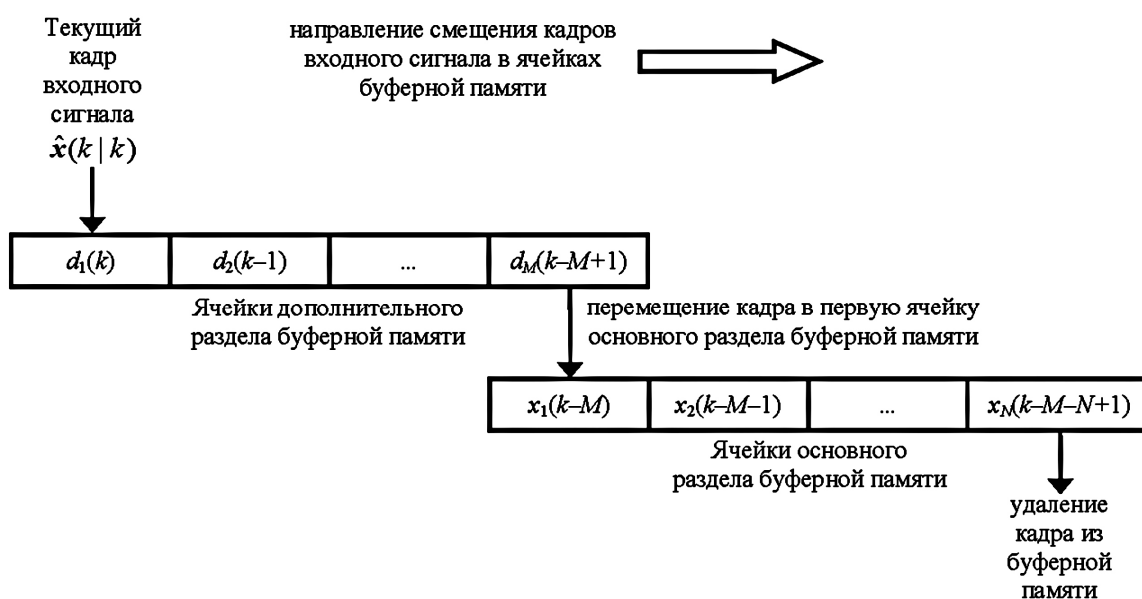


Рис. 7. Схема организации работы буферной памяти АЦФ при наличии ячеек дополнительного раздела памяти

Fig. 7. Diagram of the ADF buffer memory operation if additional memory partition cells are available

Данный дополнительный раздел также организован по принципу FIFO. В этом случае каждый новый кадр входного сигнала помещается в первую ячейку дополнительного раздела, «сме-

щая» все хранившиеся в памяти предыдущие кадры на одну ячейку в направлении последней ячейки данного раздела, а кадр, находящийся в последней ячейке раздела, вытесняется из допол-

нительного раздела и перемещается в первую ячейку основного раздела буферной памяти. Количеством ячеек дополнительного раздела определяется время запаздывания работы АЦФ: данное время прямо пропорционально количеству ячеек.

Формирователь общей ошибки вычисляет общую ошибку $e(k)$ системы РФК–АЦФ, используя: вектор текущей ошибки $e_X(k)$ выхода АЦФ, вектор текущей разности $X_{diff}(k)$ РФК, вектор предыдущей ошибки $e_X(k-1)$ выхода АЦФ, вектор предыдущей разности $X_{diff}(k-1)$ РФК (рис. 6). Векторы e , e_X и X_{diff} имеют размерность n . На рис. 6 блоки z^{-1} обозначают единичную задержку.

Общая ошибка $e(k)$ системы РФК–АЦФ вычисляется, используя выражение

$$e(k)_i = \frac{1}{4} [f_i \cdot X_{diff}(k-1)_i + f_i \cdot X_{diff}(k)_i + e_X(k-1)_i + e_X(k)_i], \quad (15)$$

где $e(k)_i$ – i -ый элемент вектора $e(k)$, $i \in [0, n)$;

f_i – коэффициент, позволяющий масштабировать порядок значений элементов векторов $X_{diff}(k-1)_i$ и $X_{diff}(k)_i$ в соответствии с порядком величины элементов вектора $e_X(k)_i$:

$$1) \text{ при } \left\lfloor \left| \frac{e_X(k)_i}{X_{diff}(k)_i} \right| \right\rfloor > 0$$

$$f_i = \text{sign} \left(\frac{e_X(k)_i}{X_{diff}(k)_i} \right) \cdot 10^{\left\lfloor \log_{10} \left(\left\lfloor \left| \frac{e_X(k)_i}{X_{diff}(k)_i} \right| \right\rfloor \right) \right\rfloor + 1}, \quad (16)$$

$$2) \text{ при } \left\lfloor \left| \frac{e_X(k)_i}{X_{diff}(k)_i} \right| \right\rfloor = 0$$

$$f_i = \text{sign} \left(\frac{e_X(k)_i}{X_{diff}(k)_i} \right), \quad (17)$$

где операция $\lfloor \cdot \rfloor$ – округление до ближайшего целого числа в меньшую сторону;

$\text{sign}(x)$ – функция определения знака аргумента x :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0. \end{cases} \quad (18)$$

Значение $X_{diff}(k)_i$ должно быть ненулевым.

Ошибка $e(k)$ может являться средним арифметическим взвешенным значением величин $X_{diff}(k-1)$, $X_{diff}(k)$, $e_X(k-1)$ и $e_X(k)$:

$$e(k)_i = a_1 \cdot f_i \cdot X_{diff}(k-1)_i + a_2 \cdot f_i \cdot X_{diff}(k)_i + a_3 \cdot e_X(k-1)_i + a_4 \cdot e_X(k)_i, \quad (19)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – некоторые весовые коэффициенты, придающие слагаемым выражениям (19) большего или меньшего веса в вычисляемом значении $e(k)$, причем $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1,0$.

Результаты и их обсуждение

Для изучения возможностей применения системы РФК–АЦФ в качестве цифрового фильтра проводился вычислительный эксперимент с целью моделирования и сравнения результатов работы следующих цифровых фильтров:

- РФК;
- АЦФ с алгоритмом LMS (далее обозначается «LMS»);

– АЦФ с алгоритмом NLMS (далее обозначается «NLMS»);

– последовательная фильтрация сигнала РФК и АЦФ с алгоритмом NLMS (далее обозначается «РФК→NLMS»);

– система РФК–АЦФ с алгоритмом NLMS (далее обозначается «РФК+NLMS»).

На вход каждого из фильтров подавались три вида сигналов:

– синусоидальный сигнал с частотой следования 10 кГц и амплитудой 1,0 для незашумленного сигнала;

– сигнал «меандр» с частотой следования 10 кГц и амплитудой 1,0 для незашумленного сигнала;

– составной (полигармонический) сигнал, описываемый функцией от времени t : $f(t) = 0,625 \cdot \cos(2\pi \cdot 10000 \cdot t) + 0,39 \cdot \sin(2\pi \cdot 50000 \cdot t)$ с частотой следования 10 кГц и максимальной амплитудой 1,0 для незашумленного сигнала.

На входы фильтров подавались каждый из данных сигналов без шума и с наложенным белым шумом разной максимальной амплитуды, выраженной в процентах от максимальной амплитуды незашумленного сигнала.

Моделирование работы фильтров проводилось с постоянным шагом (интервалом) времени $t = 10^{-7}$ с (10^7 итераций/с).

Для получения результатов фильтрации РФК применялся РФК с максимальным числом состояний $n = 7$ и наблюдений $m = 7$, при этом фильтруемый (входной) сигнал являлся только

одним из наблюдений m , а отфильтрованный (выходной) сигнал был одним из состояний n . Была выполнена настройка РФК, при которой только одному наблюдению (входному сигналу) соответствовали состояния $n = 7$. Результат РФК с данной настройкой использовался также в последовательной фильтрации сигнала РФК и АЦФ с алгоритмом NLMS и в системе РФК–АЦФ.

Для фильтров LMS, NLMS, РФК→NLMS, РФК+NLMS количество ячеек основного раздела буферной памяти было принято $N = 32$, количество ячеек дополнительного раздела буферной памяти было принято $M = 4$.

Величина шага сходимости μ для фильтров LMS, NLMS, РФК→NLMS, РФК+NLMS определялась, следуя выражению

$$\mu = \frac{1}{((N + M) \cdot 1000)}, \quad (20)$$

где N и M – количество ячеек основного раздела и дополнительного раздела буферной памяти АЦФ соответственно. Для фильтров NLMS, РФК→NLMS, РФК+NLMS было принято значение $\varepsilon = 0,1$ (9).

При моделировании работы системы РФК–АЦФ использовалось выражение (15) для задания соотношения величин $X_{diff}(k-1)$, $X_{diff}(k)$, $e_X(k-1)$ и $e_X(k)$ при расчете общей ошибки $e(k)$.

Для оценки результата фильтрации сигнала использовались величины:

$$\text{MSE} \quad (12),$$

MAE (13),

ОСШ, выраженное в дБ (14).

Графики некоторых результатов моделирования работы цифровых фильтров (РФК, РФК→NLMS, РФК+NLMS) при разных входных сигналах с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала приведены на рис. 8–16.

Графики оценок MSE, MAE, ОСШ результатов фильтрации сигналов с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала фильтрами РФК, LMS, NLMS, РФК→NLMS, РФК+NLMS показаны на рис. 17–25. Для значений величин оценок применялось сглаживание методом скользящего среднего.

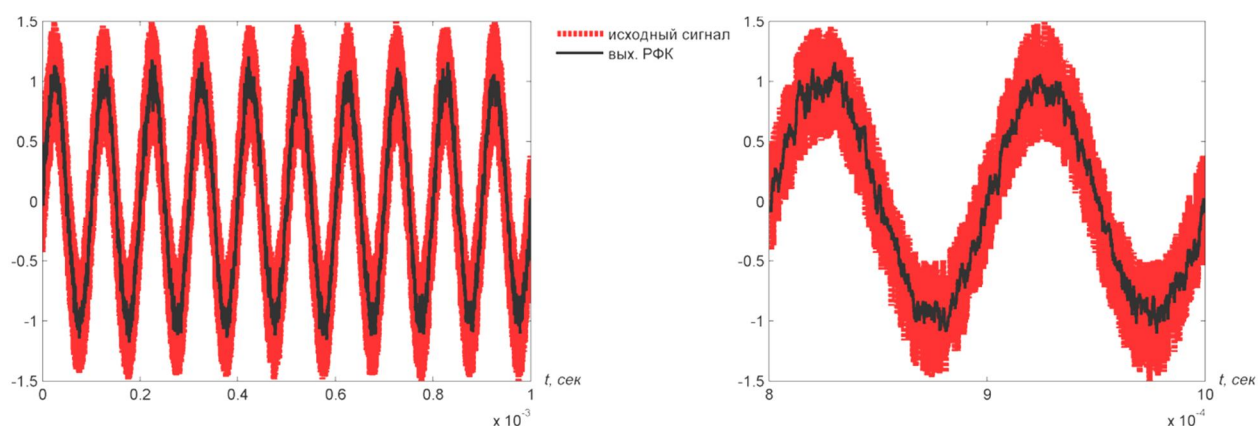


Рис. 8. Результат моделирования работы РФК при синусоидальном входном сигнале с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 8. The result of simulation of EKF operation with a sinusoidal input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

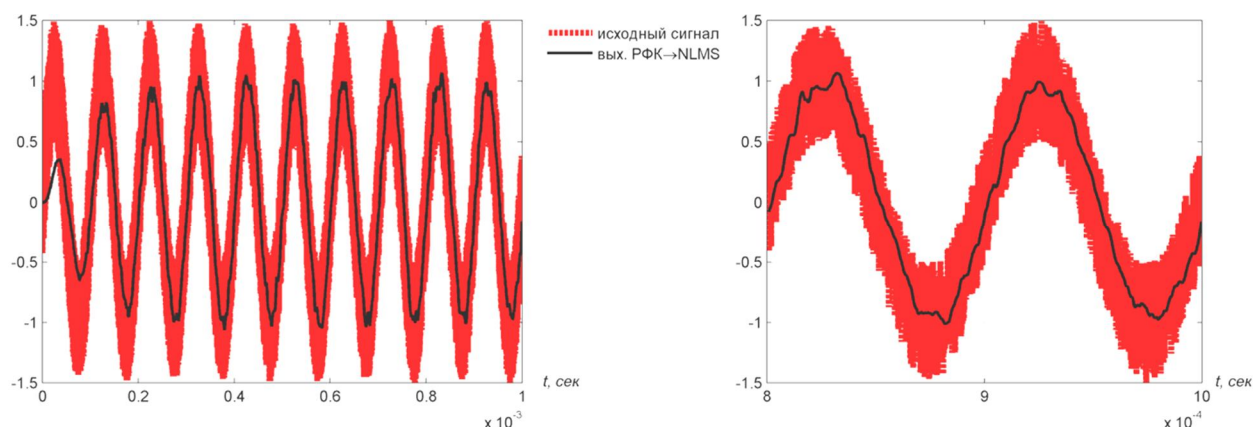


Рис. 9. Результат моделирования последовательной работы РФК→NLMS при синусоидальном входном сигнале с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 9. The result of simulation the sequential operation of EKF→NLMS with sinusoidal input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

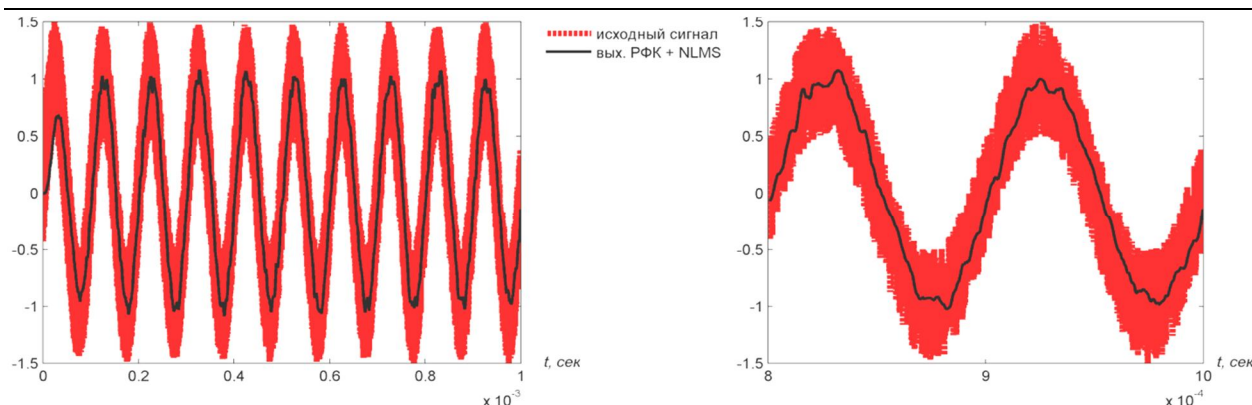


Рис. 10. Результат моделирования работы РФК+NLMS при синусоидальном входном сигнале с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 10. The result of simulation of EKF+NLMS operation with a sinusoidal input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

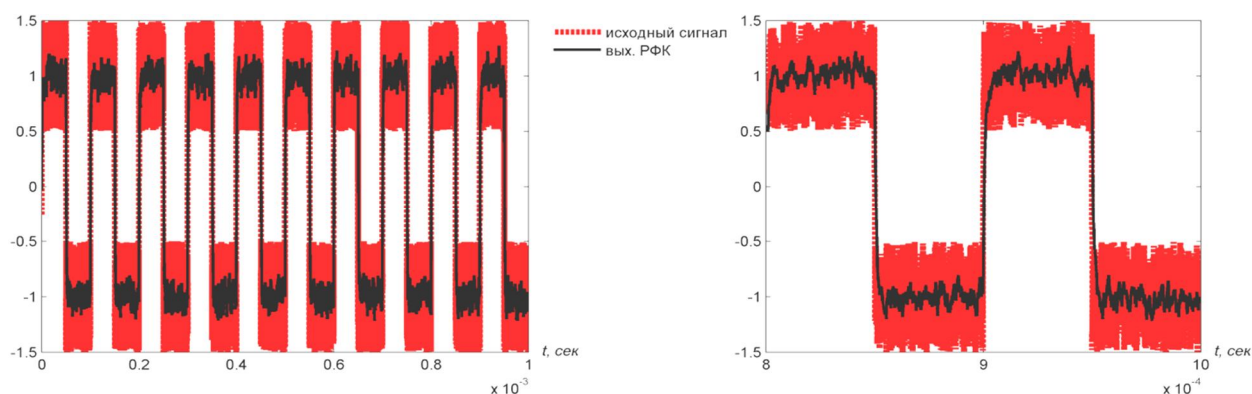


Рис. 11. Результат моделирования работы РФК при входном сигнале «меандр» с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 11. The result of simulation of EKF operation with the 'meander' input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

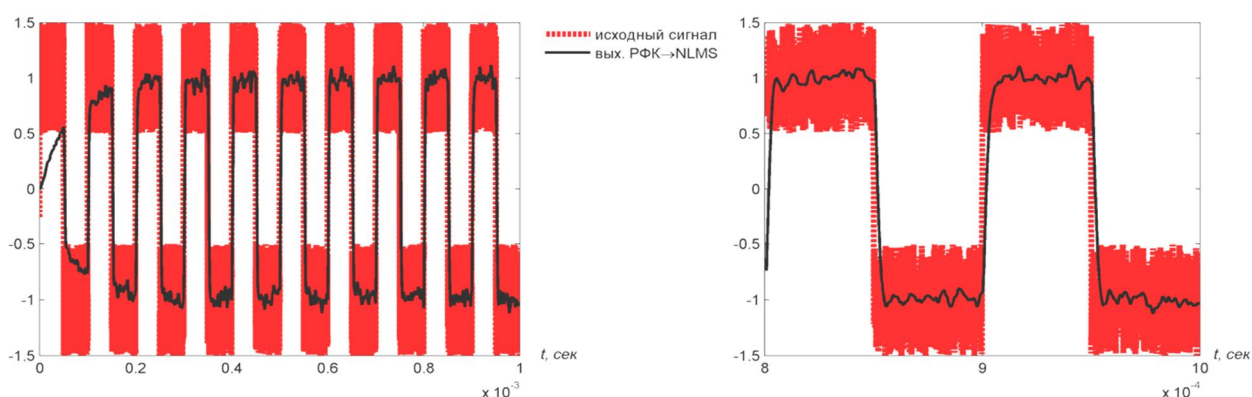


Рис. 12. Результат моделирования последовательной работы РФК→NLMS при входном сигнале «меандр» с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 12. The result of simulation the sequential operation of EKF→NLMS with the 'meander' input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

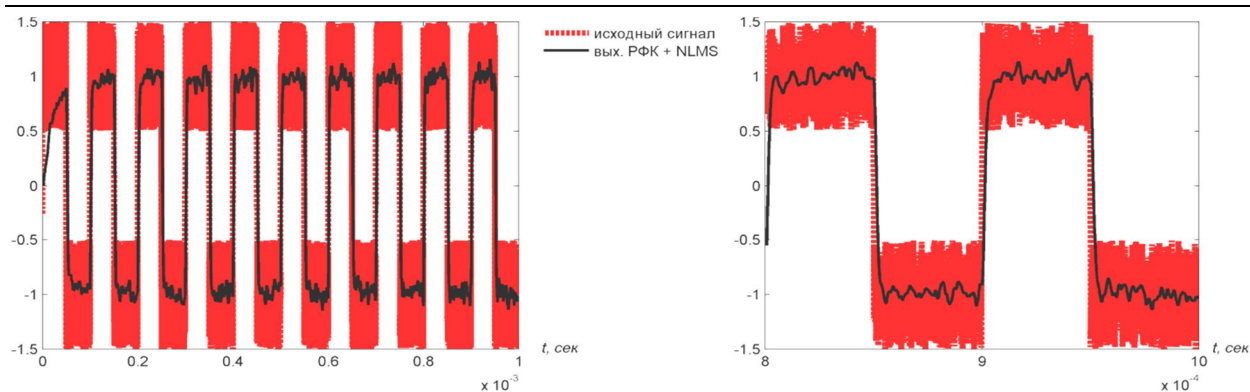


Рис. 13. Результат моделирования работы РФК+NLMS при входном сигнале «меандр» с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 13. The result of simulation of EKF+NLMS operation at the 'meander' input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

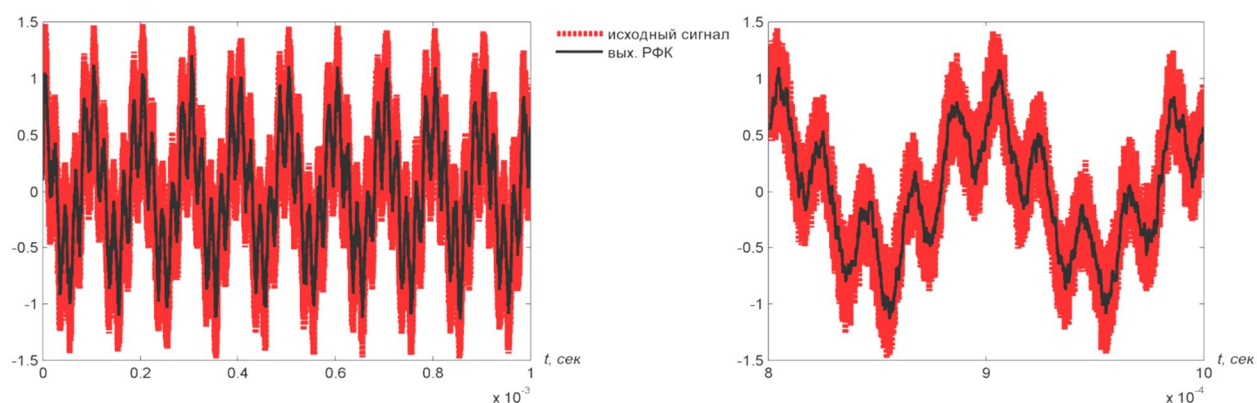


Рис. 14. Результат моделирования работы РФК при составном входном сигнале с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 14. The result of simulation of EKF operation with a composite input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

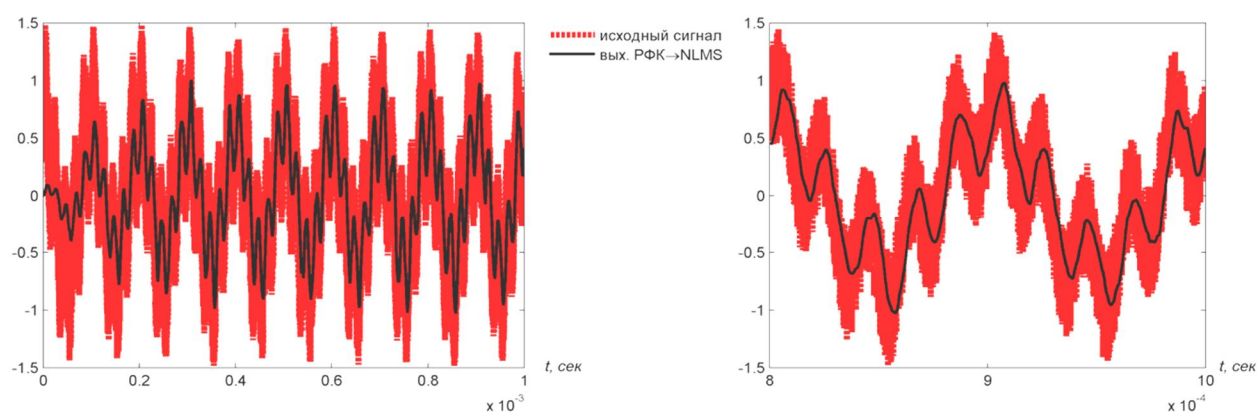


Рис. 15. Результат моделирования последовательной работы РФК→NLMS при составном входном сигнале с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 15. The result of simulation the sequential operation of EKF→NLMS with a composite input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude noiseless input signal

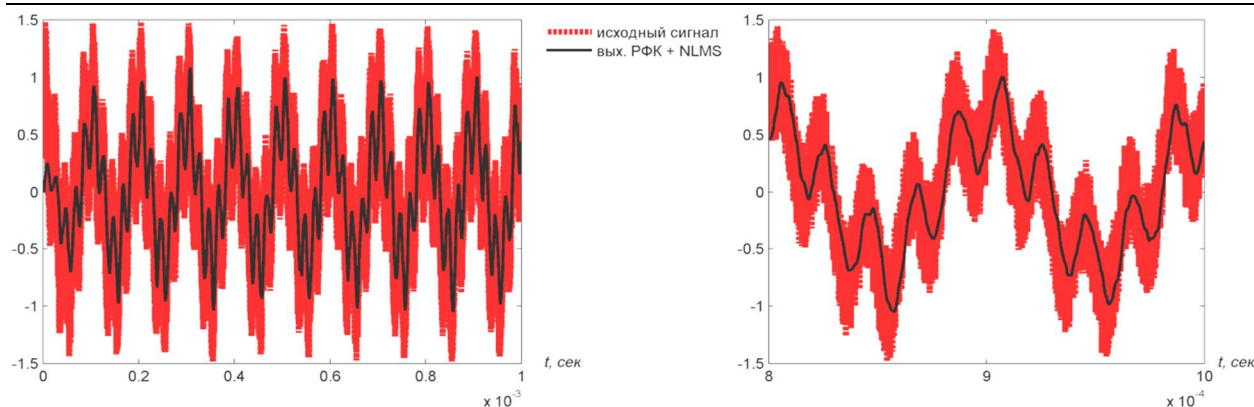


Рис. 16. Результат моделирования работы РФК+NLMS при составном входном сигнале с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 16. The result of modeling the operation of EKF+NLMS with a composite input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

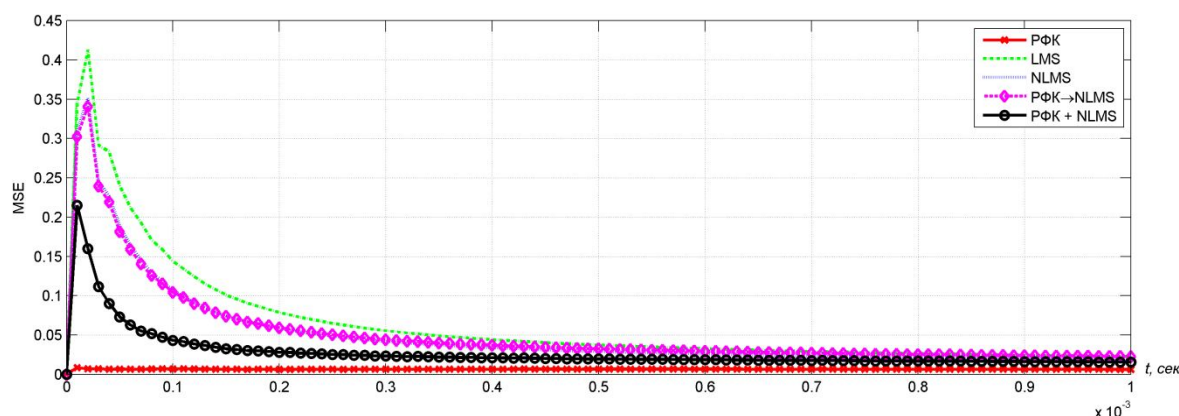


Рис. 17. Графики оценок MSE результатов фильтрации синусоидального входного сигнала с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 17. Graphs of MSE evaluation of the results of filtering a sinusoidal input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

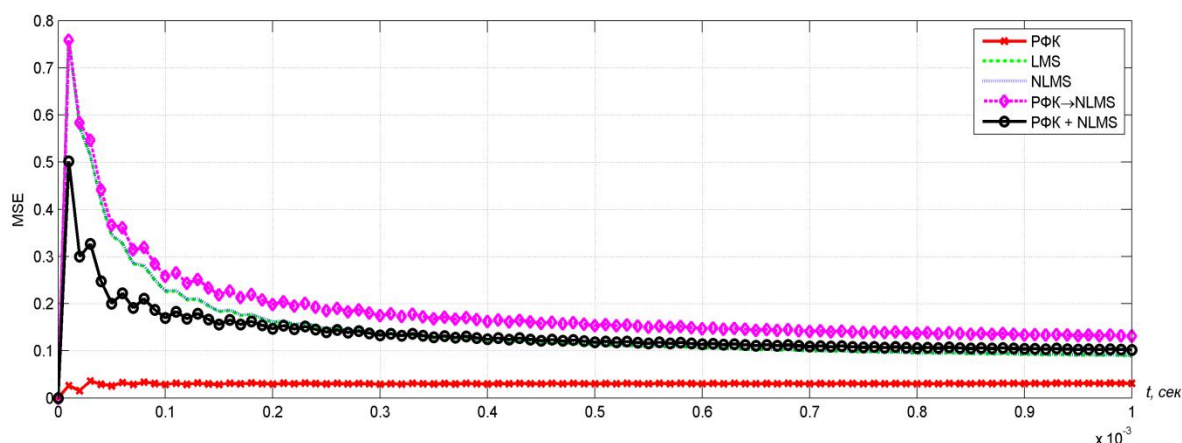


Рис. 18. Графики оценок MSE результатов фильтрации сигнала «меандр» с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 18. Graphs of MSE evaluation of the results of filtering the 'meander' signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

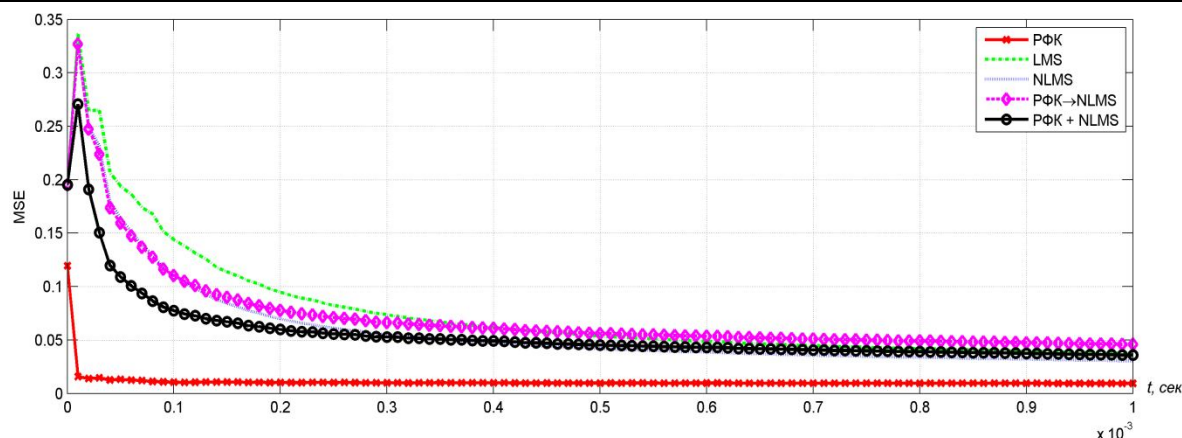


Рис. 19. Графики оценок MSE результатов фильтрации составного входного сигнала с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 19. Graphs of MSE evaluation of the results of filtering a composite input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

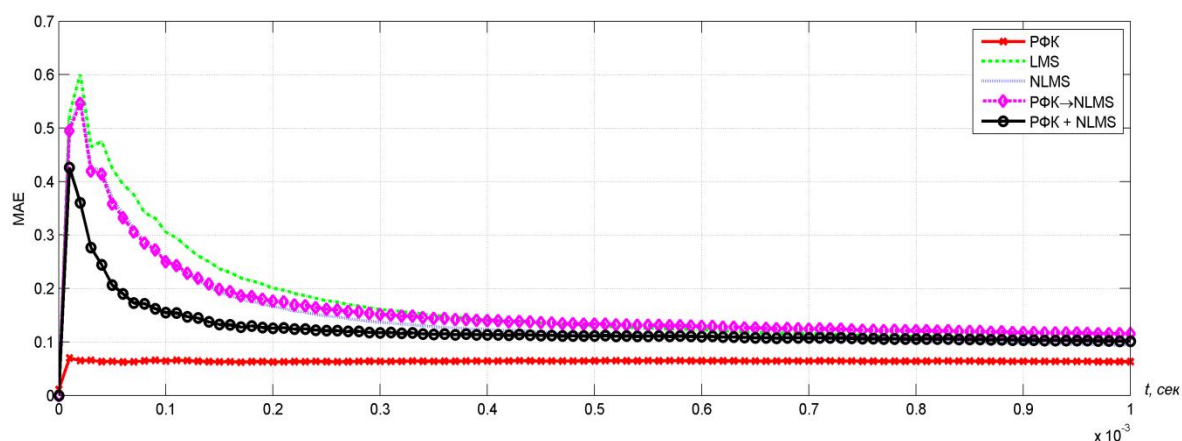


Рис. 20. Графики оценок MAE результатов фильтрации синусоидального входного сигнала с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 20. Graphs of MAE evaluation of the results of filtering a sinusoidal input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

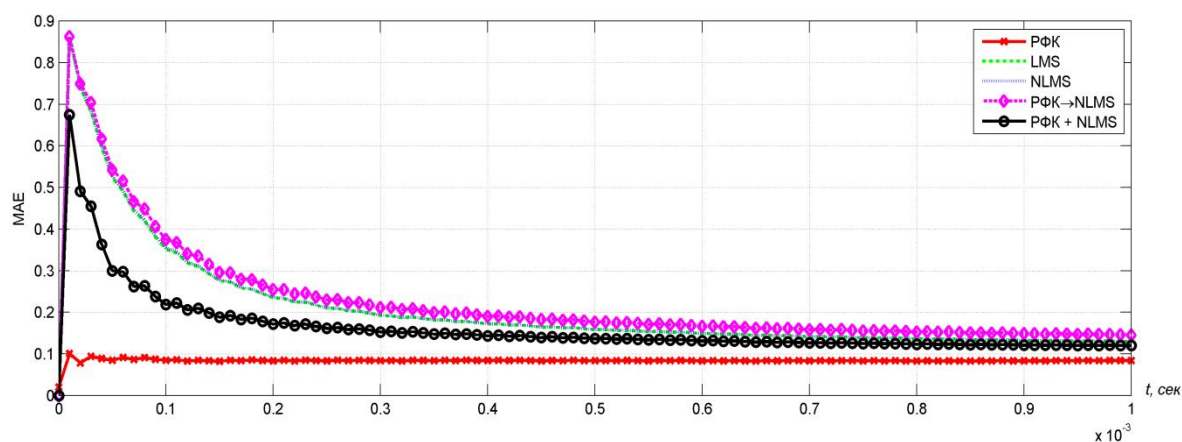


Рис. 21. Графики оценок MAE результатов фильтрации сигнала «меандр» с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 21. Graphs of MAE evaluation of the results of filtering the 'meander' signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

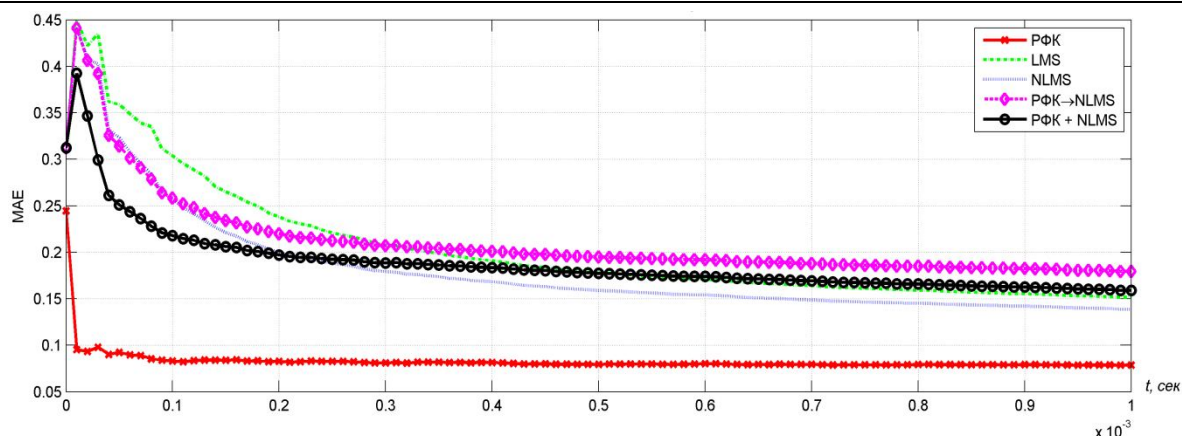


Рис. 22. Графики оценок MAE результатов фильтрации составного входного сигнала с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 22. Graphs of the MAE evaluation of the results of filtering a composite input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

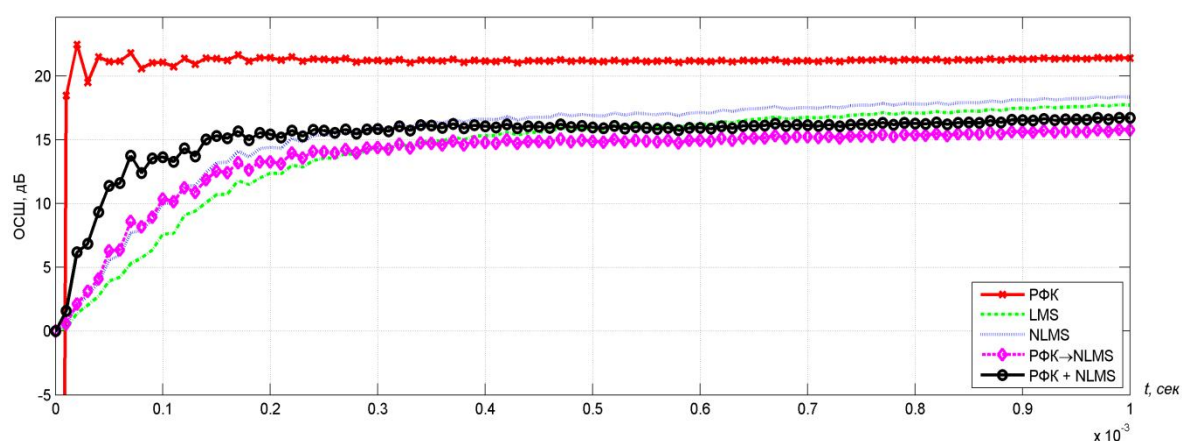


Рис. 23. Графики оценок ОСШ результатов фильтрации синусоидального входного сигнала с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 23. Graphs of transfers bars evaluation of the results of filtering a sinusoidal input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

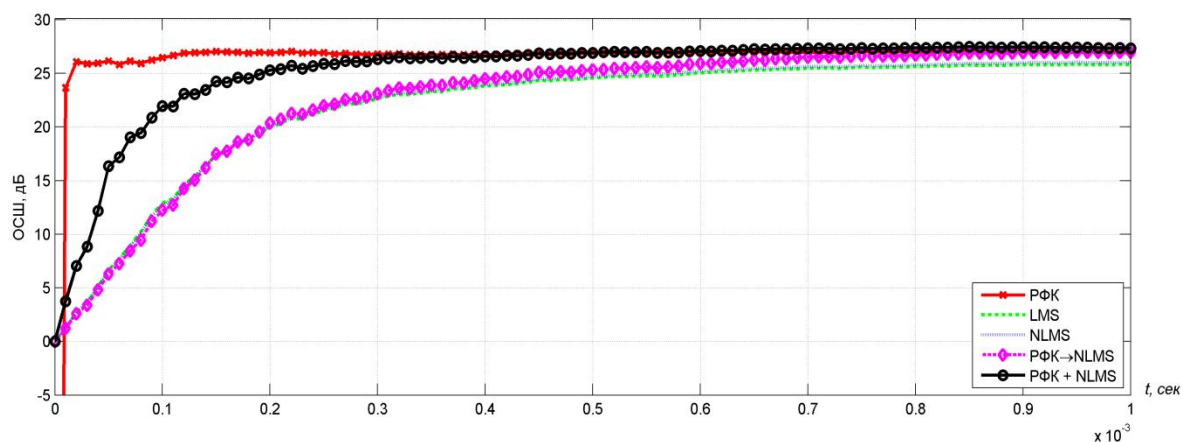


Рис. 24. Графики оценок ОСШ результатов фильтрации сигнала «меандр» с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 24. Graphs of transfers bars evaluation of the results of filtering the 'meander' signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

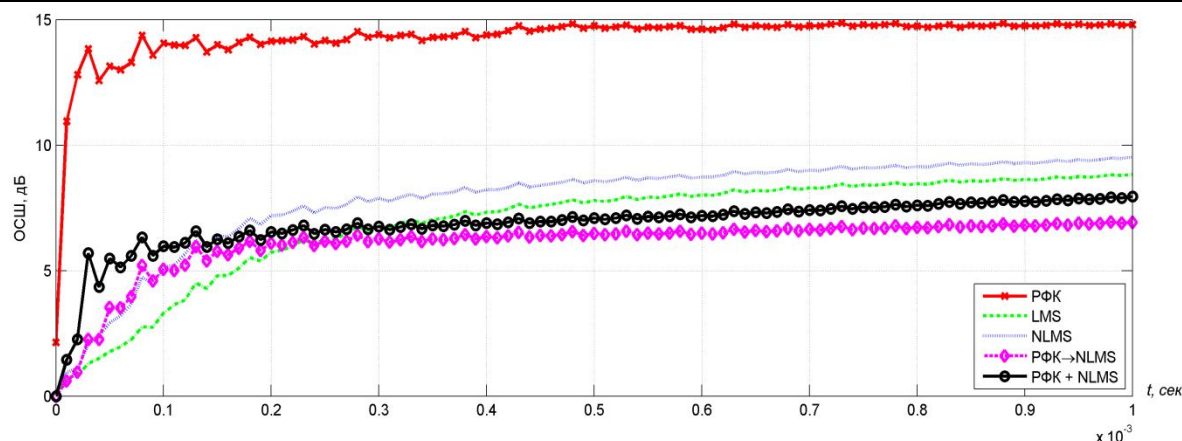


Рис. 25. Графики оценок ОСШ результатов фильтрации составного входного сигнала с белым шумом максимальной амплитудой 50% от максимальной амплитуды незашумленного входного сигнала

Fig. 25. Graphs of transfers bars evaluation of the results of filtering a composite input signal with white noise with a maximum amplitude of 50% of the maximum amplitude of the noiseless input signal

Сравнение результатов моделирования работы цифровых фильтров показывает, что скорость сходимости алгоритма цифрового фильтра РФК+NLMS выше, чем скорость сходимости алгоритма последовательной фильтрации РФК→NLMS, притом, что при некоторых формах входного сигнала значение ОСШ у фильтра РФК+NLMS больше, чем у РФК→NLMS. При подаче на входы фильтров сигнала «меандр» значение ОСШ алгоритма РФК→NLMS становится равным или большим ОСШ РФК+NLMS. Скорость сходимости алгоритма РФК+NLMS больше скорости РФК→NLMS, но меньше скорости РФК. С точки зрения рассмотренных оценок РФК даёт лучший результат фильтрации при высокой скорости сходимости и низком качестве сглаживания цифрового сигнала по сравнению с алгоритмами РФК→NLMS и РФК+NLMS. Алгоритмы NLMS и РФК→NLMS обладают схожей скоростью сходимости. По результатам

большинства опытов вычислительного эксперимента самым медленным алгоритмом является LMS.

Выводы

При различных вариантах организации работы буферной памяти АЦФ скорректированные значения оценки состояния системы «мобильный робот-среда» могут отличаться. При малом числе кадров входных данных и весовых коэффициентов АЦФ будет наблюдаться низкое качество подавления помехи. С увеличением числа кадров и весовых коэффициентов улучшается качество подавления помехи, а скорость сходимости алгоритма адаптации уменьшается. Кроме этого, чем больше число кадров и весовых коэффициентов АЦФ, тем выше требования к вычислительной мощности и объему оперативной памяти бортового вычислителя робота. Значительное число кадров и весовых коэффициентов не гарантирует

высокого качества подавления помехи и, как следствие, значительной компенсации ошибки РФК. При некотором количестве кадров и весовых коэффициентов достигается оптимальное качество подавления помехи, но при повышении этого количества увеличение подавления помехи может не наблюдаться или будет незначительным. Важной задачей является подбор числа кадров и весовых коэффициентов АЦФ, при котором достигается оптимальное качество подавления помехи и скорость

сходимости алгоритма адаптации. Алгоритм цифрового фильтра РФК+NLMS занимает промежуточное место между алгоритмами РФК и РФК→NLMS по критериям оценок MSE, MAE, ОСШ и скорости сходимости. Предлагаемый фильтр РФК+NLMS может найти применение при выполнении комплексирования данных системы управления мобильным роботом с целью компенсации ошибки работы расширенного фильтра Калмана.

Список литературы

1. Control system of the independent undersea robot / S.F. Jatsun, P.A. Bezmen, A.V. Malchikov, A.S. Jatsun // Science and Education. Materials of the II International research and practice conference. Munich, Germany: Vela-Verlag Waldkraiburg, 2012. Vol. 1. P. 165-170.
2. Безмен П.А. Система управления движением мобильного шестиколесного робота // Естественные и технические науки. 2014. № 1. С. 126-127.
3. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №23(2). С. 53-64. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64>.
4. Katoch R., P. R. Mahapatra Neural network augmentation of attitude estimation using navigation satellite signal phase // 9th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. IFAC Proceedings Volumes. 2007. Vol. 40. Is. 13. P. 386-391.
5. Chi L. Application of neural networks in target tracking data fusion // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1994. Vol. 30. Is. 1. P. 281-287.
6. Хайки С. Нейронные сети: полный курс. [пер. с англ.]. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
7. Widrow B., Hoff M.E. Adaptive switching circuits // Proc. IRE WESCON Conf. Rec. 1960. Part 4, P. 96-104.
8. Plackett R.L. Some Theorems in Least Squares // Biometrika. 1950. Vol. 37. Is. 1-2. P. 149-157.

9. Бычков Б.И., Романовский А.С., Хартов В.Я. Моделирование помехозащищенных речевых каналов для технических систем управления // Радиооптика. 2016. № 5. С. 11-25.
10. Adaptive algorithms for acoustic echo cancellation in speech processing / R. Chinaboina, D.S. Ramkiran, H. Khan, M. Usha, B.T.P. Madhav, K.P. Srinivas, G.V. Ganesh // International Journal of RRAS. 2011. Vol.7, is. 1. P. 38-42.
11. Dhiman J., Ahmad S., Gulia K. Comparison between Adaptive filter Algorithms (LMS, NLMS and RLS) // International Journal of Science, Engineering and Technology Research. 2013. Vol. 2, is. 5, P. 1100-1103.
12. Takekawa H., Shimamura T., Jimaa S. An efficient and effective variable step size NLMS algorithm // Conference Record of 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, USA, 2008. P. 1640-1643.
13. Kumudini S., Sinha R. Normalized Least Mean Square (NLMS) Adaptive Filter for Noise Cancellation // International Journal of Progresses in Engineering, Management, Science and Humanities. 2015. Vol. 1, is. 1. P. 49-53.
14. Ghauri S.A., Sohail M.F. System Identification using LMS, NLMS and RLS // IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD), 2013. P. 65-69.
15. Ушенина И.В. Реализация алгоритмов цифровой адаптивной фильтрации на ПЛИС // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2012. № 5. С. 134-138.
16. Lehmann E.L., Casella G. Theory of Point Estimation, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 590 p.
17. Pappas T.N., Safranek R.J., Chen J. Perceptual criteria for image quality evaluation // Handbook of Image and Video Processing, 2nd ed. Oxford: Elsevier Academic Press, 2005. P. 939-959.
18. Wang Z., Bovik A.C. Wang, Z. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures // IEEE Signal Processing Magazine. 2009. Vol. 26, is. 1. P. 98-117.
19. Айфичер Э., Джервис Б.В. Цифровая обработка сигналов: практ. подход / пер. с англ. И. Ю. Дорошенко, А. В. Назаренко. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 989 с.
20. Kruse R. L., Ryba A. J. Data structures and program design in C++ // Prentice-Hall. 1999. 717 p.

References

1. Jatsun S.F., Bezmen P.A., Malchikov A.V., Jatsun A.S. Control system of the independent undersea robot. *Science and Education. Materials of the II International research*

and practice conference. Munich, Germany, Vela-Verlag Waldkraiburg Publ., 2012, vol. 1, pp. 165-170.

2. Bezmen P.A. Sistema upravleniya dvizheniem mobil'nogo shestikolesnogo robota [Movement control system of mobile six-wheeled robot]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* = *Natural and technical sciences*, 2014, no. 1, pp. 126-127 (In Russ.).

3. Bezmen P.A. Kompleksirovanie dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom s ispol'zovaniem rasshirennogo fil'tra Kalmana [Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 2, pp. 53-64. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64>. (In Russ.).

4. Katoch R., Mahapatra P. R. Neural network augmentation of attitude estimation using navigation satellite signal phase. *9th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. IFAC Proceedings Volumes*, 2007, vol. 40, is. 13, pp. 386-391.

5. Chin L. Application of neural networks in target tracking data fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, vol. 30, is. 1, pp. 281-287.

6. Haykin S. *Neironnye seti: polnyi kurs* [Neural networks: full course]. Moscow, Vil'yams Publ., 2006, 1104 p. (In Russ.).

7. Widrow B., Hoff M.E. Adaptive switching circuits. *Proc. IRE WESCON Conf. Rec.*, 1960, part 4, pp. 96-104.

8. Plackett R.L. Some Theorems in Least Squares. *Biometrika*, 1950, vol. 37, is. 1-2, pp. 149-157.

9. Bychkov B.I., Romanovskii A.S., Khartov V. Ya. Modelirovanie pomekhozashchishchen-nykh rechevykh kanalov dlya tekhnicheskikh sistem upravleniya [Noise-Free Speech Channel Modeling for Technical Control Systems]. *Radiooptika* = *Radiooptics*, 2016, no. 5, pp. 11-25 (In Russ.).

10. Chinaboina R., Ramkiran D.S., Khan H., Usha M., Madhav B.T.P., Srinivas K.P., Ganesh G.V. Adaptive algorithms for acoustic echo cancellation in speech processing. *International Journal of RRAS*, 2011, vol. 7, is. 1, pp. 38-42.

11. Dhiman J., Ahmad S., Gulia K. Comparison between Adaptive filter Algorithms (LMS, NLMS and RLS). *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2013, vol. 2, is. 5, pp. 1100-1103.

12. Takekawa H., Shimamura T., Jimaa S. An efficient and effective variable step size NLMS algorithm, Conference Record of 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, USA, 2008, pp. 1640-1643.

13. Kumudini S., Sinha R. Normalized Least Mean Square (NLMS) Adaptive Filter for Noise Cancellation. *International Journal of Progresses in Engineering, Management, Science and Humanities*, 2015, vol. 1, is. 1, pp. 49-53.

14. Ghauri S.A., Sohail M.F. System Identification using LMS, NLMS and RLS. IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED), 2013, pp. 65-69.
15. Ushenina I.V. Realizatsiya algoritmov tsifrovoi adaptivnoi fil'tratsii na PLIS. [FPGA-based implementation of digital adaptive filtering algorithms]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*, 2012, no. 5, pp. 134-138 (In Russ.).
16. Lehmann E.L., Casella G. Theory of Point Estimation. New York, Springer-Verlag Publ., 1998, 590 p.
17. Pappas T.N., Safranek R.J., Chen J. Perceptual criteria for image quality evaluation. Handbook of Image and Video Processing. Oxford, Elsevier Academic Press, 2005, pp. 939-959.
18. Wang Z., Bovik A.C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, vol. 26, is. 1, pp. 98-117.
19. Ifeakor E., Jervis B.W. *Tsifrovaya obrabotka signalov: prakticheskiy podhod* [Digital Signal Processing: A Practical Approach]. Moscow, William Publ., 2004. 989 p. (In Russ.).
20. Kruse R. L., A Ryba. J. Data structures and program design in C++. Prentice-Hall, 1999, 717 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Безмен Петр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pbezmen@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0001-7335-1141, ResearcherID: P-6709-2016

Petr A. Bezmen, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pbezmen@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0001-7335-1141, ResearcherID: P-6709-2016

Реализация механизмов контактно-конденсационной теории твердения при формировании строительных композитов

М.П. Степанова ¹, О.А. Сотникова ¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
ул. 20 лет Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: hundred@vgasu.vrn.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной работы является изучение композиционных материалов для строительных конструкций, которые являются более дешевыми, т.к. бесцементные и без тепловой обработки, что позволит им несомненно найти применение в строительных конструкциях и занять свою строительную нишу. В связи с этим необходимым является выявление закономерности структурообразования бесклинкерных композиционных материалов контактно-конденсационного твердения, в которых роль матрицы выполняют кристаллы портландита, а в качестве наполнителя выступает физико-химически-активный компонент природного происхождения..

Методы. В соответствии с поставленной целью решалась одна из основных задач нашей работы, которая состояла в изучении закономерностей структурообразования контактно-конденсационных систем твердения, используя основные положения материаловедения, состоящие в изучении влияния состава, структуры и состояния исходных компонентов на свойства композиционного материала. В нашей работе изучалась роль физико-химической активности сырьевых компонентов и возможности «соединения» портландитовой матрицы с наполняющими механо-физико-химически активными сырьевыми материалами, способными давать новые структуры. Для формирования композиционного материала применялся способ компактирования прессованием, при повышенных удельных давлениях, что позволило реализовать механизмы контактно-конденсационной технологии формирования структуры. Образование физико-химических связей портландита и алюмосиликатного наполнителя различного типа возможно также при определенных соотношениях их массовых долей, В/И отношений, на оптимизацию которых также была направлена работа.

Результаты. Результатом данной работы является оценка влияния показателей характеристик сырья и параметров технологии на свойства получаемого материала. А именно, рационализация давления прессования и количества наполнителя при получении компактированного композита для строительных конструкций.

Заключение. Разработка технологии получения бесклинкерных композитов контактно-конденсационного твердения на основе портландита с алюмосиликатным наполнителем позволит расширить сырьевую базу местных строительных материалов, снизить их себестоимость и энергоемкость производства, то есть решить ключевые вопросы ресурсосбережения при производстве строительных материалов и строительных конструкций из них.

Ключевые слова: строительные конструкции; строительный композит; контактно-конденсационная теория; портландит.

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

Для цитирования: Степанова М.П., Сотникова О.А. Реализация механизмов контактно-конденсационной теории твердения при формировании строительных композитов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 90-102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-90-102>.

Поступила в редакцию 16.12.2019

Подписана в печать 27.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Implementation of Contact-Condensation Hardening Theory Mechanisms when Forming Building Composites

Maria P. Stepanova¹, Olga A. Sotnikova¹ ✉

¹ Voronezh State Technical University
20 Let Oktyabrya str. 84, Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: hundred@vgasu.vrn.ru

Abstract

Purpose of research is to study cheaper composite materials for building structures such as cement-free ones without heat treatment, which will undoubtedly allow finding their application in building industry. To achieve this goal it is necessary to identify patterns of structure formation of clinker-free contact condensation hardening composite materials in which portlandite crystals act as a matrix, and the physicochemical active component of natural origin acts as a filler.

Methods. In accordance with the purpose set, one of the main tasks of the work was to be solved; it involved studying the patterns of structure formation of contact-condensation hardening systems relying on the basic principles of materials science, which include studying the influence of the composition, structure and state of the starting components on the properties of a composite material. In this work, we studied the role of the physicochemical activity of raw materials and the possibility of 'combining' a portlandite matrix with filling mechano-physicochemical active raw materials capable of producing new structures. To form the composite material, a compaction pressing technique at elevated specific pressures was used, which made it possible to implement the mechanisms of contact condensation technology of structure formation. The formation of physicochemical bonds of portlandite and aluminosilicate filler of various types is also possible with certain ratios of their mass fractions and V/I ratios the optimization of which was one of our objectives.

Results. The result of this work is to assess the impact of raw material characteristics and technology parameters on the properties of the resulting material, namely, the improvement of the compacting pressure and the amount of filler when getting a compacted composite.

Conclusion. The development of a technology of producing clinker-free contact condensation composites based on portlandite with aluminosilicate filler will expand the raw material base of local building materials, reduce their cost and energy consumption, that is, solve key issues of resource saving in the building materials production.

Keywords: building structures; building composite; contact condensation theory; portlandite.

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

For citation: Stepanova M. P., Sotnikova O. A. Implementation of Contact-Condensation Hardening Theory Mechanisms when Forming Building Composites. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 90-102 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-90-102>.

Received 16.12.2019

Accepted 27.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

На сегодняшний день при изготовлении строительных конструкций и деталей цемент и материалы на его основе вытеснили другие, менее энергоемкие виды вяжущих и материалы на их основе. Однако такая тенденция является не совсем оправданной, т.к. в строительстве имеется целый ряд строительных конструкций, в которых целесообразным является использование именно более дешевых материалов и отказ от изделий на клинкерных вяжущих. Это могут быть и несущие конструкции зданий и сооружений, внутренние ограждающие конструкции (перегородки, самонесущие стены, конструкции для заполнения проемов и т.д.). Строительные конструкции, возводимые из композиционных материалов, рассматриваемые в качестве объекта исследований в нашей работе, будут надежными, обладающими приемлемой, достаточной прочностью, жесткостью и, что немаловажно для строительных конструкций, – экономичностью. Исследуемые бесклинкерные композиты обладают уникальными свойствами, которые зависят от свойств компонентов, входящих в них. Однако нельзя сказать, что свойства композита будут повторять свойства сырьевых материалов. Именно в том и состоит их особенность и уникальность. Используя основные положения материаловедения, состоящие в изучении влияния состава, структуры и состояния исходных компонентов на структурооб-

разование композиционного материала, в нашей работе изучалась роль физико-химической активности сырьевых компонентов, их «степени подготовленности» на свойства полученного материала. В качестве матрицы (основы) были использованы предварительно полученные кристаллы портландита, которые соединялись с механо-физико-химически активным наполнителем. По структуре наполнители для композитов могут быть различными – это и волокнистые материалы, и слоистые, и дисперсные. Нами был выбран алюмо-силикатный наполнитель, природный по происхождению, тонкоизмельченный до состояния дисперсного порошка, т.е. механо-активированный. Этот наполнитель был выбран не случайно, а исходя из его минералогического состава и активности по отношению к матрице. При компактировании и реализации механизмов контактно-конденсационного твердения, можно рассчитывать на возникновение структурных связей между ними с образованием гидросиликатов Са.

Анализ современных работ [1-7] показывает, что с использованием теории контактно-конденсационного твердения разработаны технологии производства элементов дорожных покрытий, кирпича, плиток, и других изделий. Так, на основе принципа «контактного твердения» в ИжГТУ разработаны минеральные золошлаковые композиции для оснований

дорожных одежд автомобильных дорог [8]. В качестве сырьевых материалов была использована золошлаковая смесь кислого состава, песчано-гравийная смесь, а в качестве активатора – СаО. При строительстве опытных участков дорог наблюдалось уплотнение смеси, применяемой в качестве основания, при соблюдении оптимальной влажности. Полотно основания оказывалось плотное и прочное, и к третьим суткам возможно было укладывать асфальтобетонное покрытие. Во многом такой эффект достигается при реализации принципов контактно-конденсационной технологии.

Материалы и методы

Принцип «контактного твердения» основан на способности дисперсных силикатных и алюмосиликатных веществ, находящихся в аморфном состоянии, образовывать прочный водостойкий материал в момент сближения частиц при уплотнении. «Эффект упорядочения структуры минеральных веществ», открытый в 50-е годы XX столетия, обуславливает получение искусственного камня в момент уплотнения при формировании конструкций, что принципиально отличает вяжущие и бетоны контактного твердения от вяжущих и бетонов гидратационного твердения. При этом образующиеся структурные связи хорошо противостоят диспергирующему действию воды [9]. Для реализации механизмов контактно-конденсационной технологии необходимым является подготовка сы-

рьевых компонентов и достижения ими неравновесного энергетического состояния. При выполнении экспериментальных исследований для изготовления образцов композиционного материала были использованы сырьевые материалы, удовлетворяющие требованиям соответствующих стандартов:

1. Известь комовая негашеная с активностью (массовой долей активного СаО) – 94,8 %, быстрогасящаяся (со скоростью гидратации 5-6 минут) и температурой гидратации 79,6 °С, размолотая до удельной площади поверхности частиц 4600 - 4700 см²/г.

2. Алюмосиликатный наполнитель – трепел – тонкопористая осадочная порода, которая состоит из кальцита и кварца, в ней кварц представлен преимущественно аморфной фазой тридимит-кристобалитового ряда, с примесью глинистых минералов [10]. Химический состав наполнителя представлен в табл.

1. Основываясь на данных исследования структуры и состава наполнителя, можно полагать, что содержащаяся в нем аморфная фаза в виде кристобалита, тридимита, аморфизированного глинистого вещества окажется реакционно активной по отношению к гидрату СаО и в результате физико-химических взаимодействий и образования структурных связей между матрицей и наполнителем, при реализации механизмов контактно-конденсационной технологии, можно рассчитывать на образование низкоосновных гидросиликатов Са.

Результаты и их обсуждение

Основными критическими точками и переделами (подпроцессами) производства изделий на основе контактно-конденсационного твердения являются представленные на рис. 1 переделы.

В данной работе производилась оценка влияния показателей характеристик сырья и параметров технологии на свойства получаемого материала. А именно, проводилась рационализация давления прессования и количества наполнителя при получении компактированного композита.

Таблица 1. Химический состав наполнителя

Table 1. Filler chemical composition

Наименование породы	Содержание основных оксидов, %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	ппп
Трепел	75,64- 82,04	5,91-11,39	2,49-6,75	0,25-1,50	0,2-2,10	0,5-2,0



Рис. 1. Критические точки и переделы производства изделий на основе контактно-конденсационного твердения

Fig. 1. Critical points and redistribution of the production of products based on contact condensation hardening

Выбор данных показателей обусловлен тем, что формирование структу-

ры прессованных портландито-алюмосиликатных композиционных материалов

происходит по контактно-конденсационному механизму омоноличивания первичных контактов в результате синтеза щелочно-кислотных гидратных соединений из насыщенных растворов щелочных и кислотных оксидов [11-13]. Образование физико-химических связей портландита и алюмосиликатного на-

полнителя различного типа возможно при определенных соотношениях их массовых долей, В/И отношений и в условиях приложения некоторого прессового давления. Возможные пределы изменения исследуемых факторов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Пределы изменения технологических параметров

Table 2. Measuring range of technological parameters

Наименование технологических параметров	Массовая доля наполнителя, %	Количество воды при гашении извести, И	Прессовое давление, МПа
Основной уровень	15	0,9	100
Верхний уровень	30	1	120
Нижний уровень	0	0,8	80

Выбор границ производился с учетом полученных прочностных показателей композитов в ранее выполненных исследованиях, а также на основании технологических условий контактно-конденсационного твердения, технических возможностей осуществления процесса прессования [14-16].

Критерием оценки влияния различных факторов на процесс структурообразования был принят предел прочности при сжатии композиционного материала непосредственно после изготовления.

В исследованиях ставились и решались следующие оптимизационные задачи:

- достижение максимума значения прочности композита непосредственно после формования;

- минимум величины прессового давления для обеспечения заданной прочности;

- оптимизация влажности сырьевой смеси для обеспечения заданной прочности.

На первом этапе необходимо было провести подбор расхода воды для данного вида извести. Давление прессования было выбрано 100 МПа, на основании ранее проводимых исследований [17-18]. Результаты расхода воды представлены на рис. 2.

По полученным данным видно, что оптимальное соотношение И/В=0,8. При меньших количествах воды (И/В=0,7) отформовать образцы оказалось невозможным, так как происходило их расслаивание.

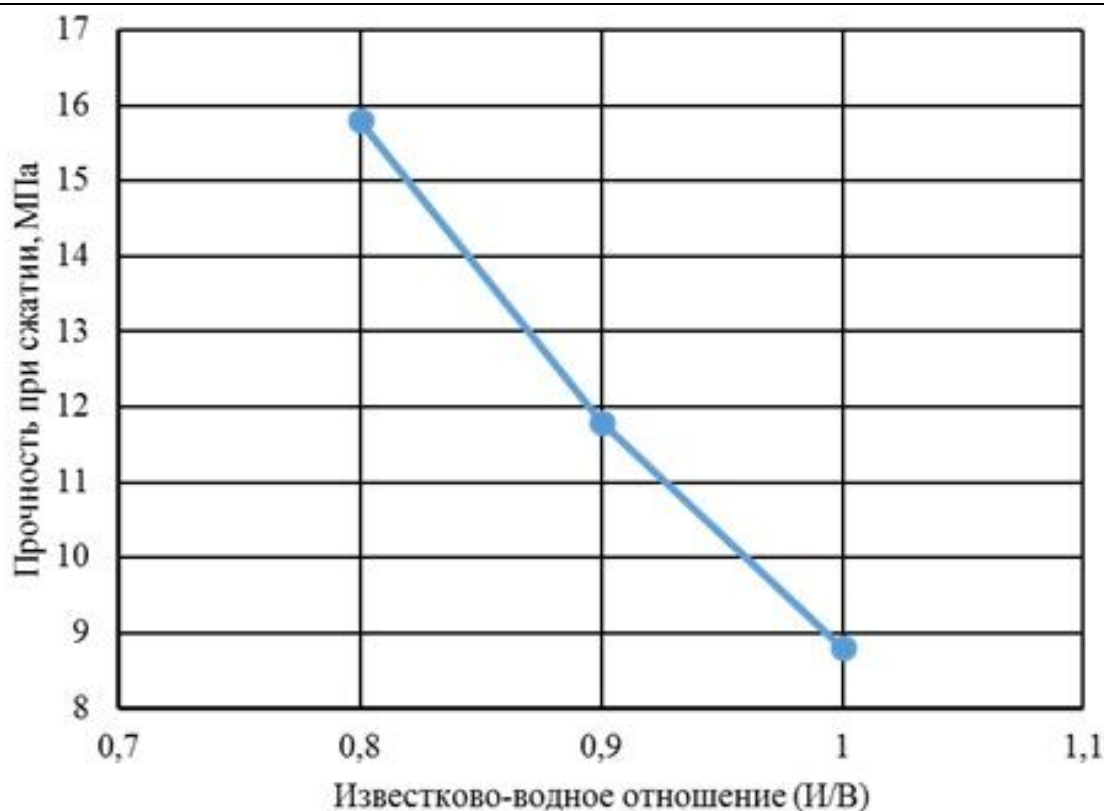


Рис. 2. Зависимость прочности образцов от известково-водного отношения

Fig. 2. The dependency of the strength of the samples on the lime-water ratio

На втором этапе проводилось изучение влияния давления прессования на прочность портландито-алюмосиликатного композита. Для реализации механизмов контактно-конденсационной технологии давление является одним из определяющих факторов для получения структуры. Считается, что удельное давление может достигать до 1000 МПа (при гиперпрессовании) [19-20]. Однако в результате наших исследований выявлено, что при одностороннем одноступенчатом прессовании (какое применялось в данной работе) оптимум прочности при сжатии образцов достигается при 100 МПа. При повышении давления до 110-120 МПа наблюдается перепрессовка и

расслаивание образцов (прочность снижается на 24 %). Таким образом, при оценке влияния массовой доли наполняющего алюмосиликатного наполнителя на прочностные показатели было применено давление 100 МПа. В ходе исследования было отмечено, что наилучшие прочностные показатели композита достигнуты при 30% алю-мосиликатного наполнителя. С течением времени прочность растет и к 28-м суткам твердения в воздушно-сухих условиях достигает 28 МПа без какой-либо тепловой обработки (рис.3).

Полученные композиционные материалы являются также водостойкими, Кразм.= 0,68-0,75 для различных со-

ставов. Именно водостойкость полученного материала позволяет выдвинуть предположение о возникновении связей не только физической природы, а также о физико-химическом взаимодействии

портландитовой матрицы и алюмосиликатного наполнителя. Однако данные предположения нуждаются в дальнейших подтверждениях методами РФА, ДТА, ИК и др.

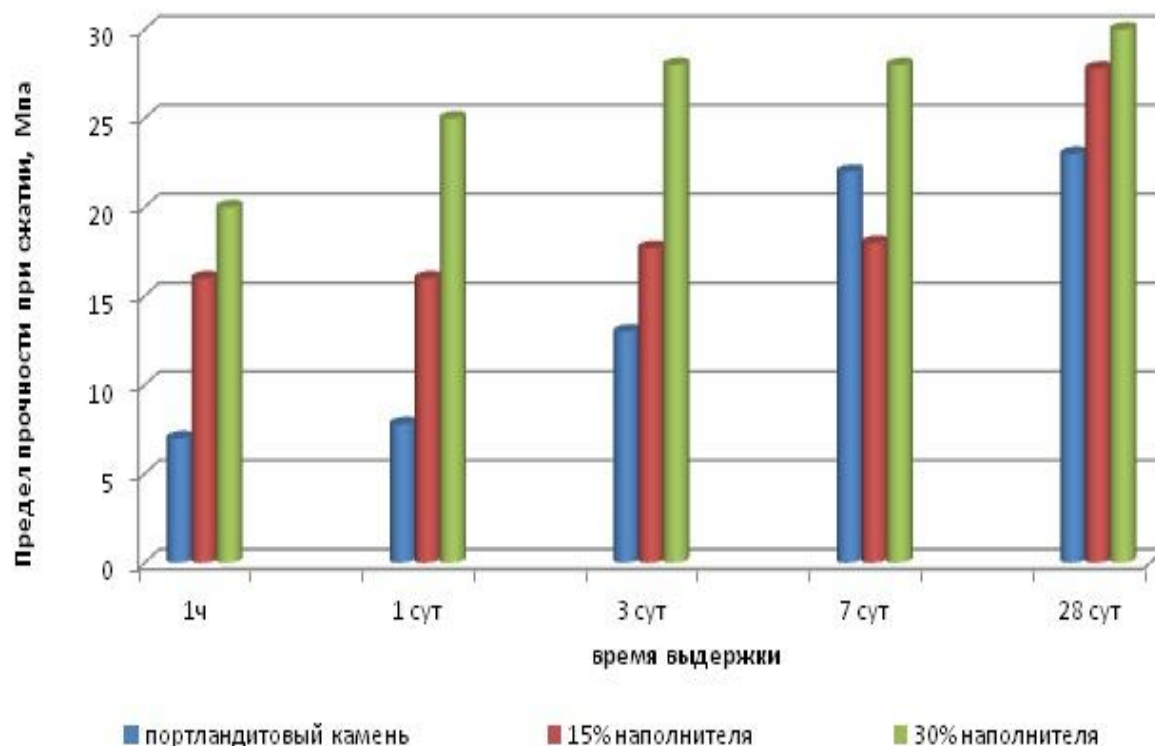


Рис. 3. Прочностные показатели композиционного материала

Fig. 3. Composite material strength parameters

Выводы

Современная тенденция использования цемента и материалов на его основе при изготовлении строительных конструкций и деталей вытеснила другие, менее энергоемкие виды вяжущих и материалы. Однако это представляется не совсем оправданным решением, т.к. в строительстве имеется целый ряд строительных конструкций, в которых целесообразным является использование именно более дешевых материалов и отказ от изделий на клинкерных вя-

жущих. Строительные конструкции, возводимые из композиционных материалов, рассматриваемые в данной работе, будут надежными, обладающими приемлемой, достаточной прочностью, жесткостью и, что немаловажно для строительных конструкций, – экономичностью.

В ходе работы была произведена оценка влияния показателей характеристик сырья и параметров технологии на свойства получаемого композиционного материала. А именно, проводилась рационализация давления прессования

и количества наполнителя при получении компактированного композита. Был получен водостойкий камень, обладающий прочностью через сутки 18 МПа и упрочняющийся к 28-м суткам до 28 МПа без какой-либо дополнительной тепловой обработки. Полученные дан-

ные позволяют рекомендовать бесклнкерный малоэнергоёмкий композиционный материал для использования в малоэтажном строительстве, при возведении несущих стен, перегородок, самонесущих стен, конструкции для заполнения проёмов и т.д.

Список литературы

1. Юдин Л. В., Турчин В. В. Строительные материалы контактного твердения на основе шлаков, зол и грунтов // Строительные материалы и изделия. 2010. № 2. С. 303-307.
2. Коренькова С. Ф., Пиявский С. А., Сидоренко Ю. В. Моделирование процессов подготовки контактно-конденсационной смеси // Успехи строительного материаловедения РААСН: материалы юбилейной конференции. Москва, 2001. С. 197 - 203.
3. Нагель А.Е., Овчаренко Г.И. Использование контактно-конденсационных материалов при строительстве оснований автомобильных дорог // Ползуновский альманах. 2018. № 2. С. 139-144.
4. Соломатов В.И. Строительное материаловедение в третьем тысячелетии // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Седьмых Академических Чтений РААСН. Белгород, 2001. Ч.1. С. 3 - 7.
5. Сидоренко Ю.В. Механизм создания контактно-конденсационной перемычки между структурообразующими элементами на мезоуровне уровне // Современные представления об инвестиционных процессах и новые строительные технологии: труды секции “Строительство” РИА. М., 2004. Вып.5. Ч.2. С.168-178.
6. Сандрашева А.О. Контактно-конденсационное твердение материалов на основе низкоосновных гидросиликатов кальция // Ползуновский альманах. 2017. Т.2. № 4. С.204-208.
7. Чернышов Е. М., Потамошнев Н. Д. Искусственный камень на основе кристаллизации портландита // Современные проблемы строительного материаловедения. Академические чтения РААСН: материалы к Междунар. конф. Самара, 1995. С. 20 – 21.
8. Юдина Л.В., Юдин А.В. Металлургические и топливные шлаки в строительстве. Ижевск: Удмуртия; М.: АСВ, 1995. 160 с.
9. Глуховский В. Д., Рунова Р. Ф., Максун С. Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. Киев: Вища школа, 1991. 243 с.
10. Юлдашбаева В.Ф., Горожанин В. М., Мичурин С. В. Химический и минеральный состав трепелов в меловых отложениях на юго-востоке Башкортостана // Геология,

полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана: сборник статей. Уфа, 2018. С.316-321.

11. Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии. М. : Недра ,1976. 344 с.
12. Бокий Г.Б. Кристаллохимия. 3 изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1971. 400 с.
13. Кристаллизация гидратных новообразований цементного камня на карбонатной подложке / Ю. И. Бенштейн, Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев, Б. С. Каверин // Силикаты: труды МХТИ. Вып. LXVIII. М., 1971. С. 238 – 242.
14. Потамошнева Н.Д., Степанова М.П. Оптимизация технологии портландито-алюмосиликатного композита контактно-конденсационного твердения // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: сборник статей по материалам 7-й международной конференции: в двух томах. 2013. С. 3-10.
15. Строительные композиты с контактно-конденсационными нано-, микроструктурными матрицами из искусственного портландита / Е. М. Чернышов, Н. Д. Потамошнева, О. Б. Кукина, М. П. Степанова // Материалы XV Академических чтений РААСН – международной научно-технической конференции. Казань, 2010. С.308-321.
16. Чернышов Е. М., Степанова М. П., Потамошнева Н. Д. Портландито-алюмосиликатные контактно-конденсационные системы твердения и композиты на их основе: возможные механизмы структурообразования // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2012. № 3(27). С. 86-96.
17. CLINKERLESS COMPOSITES WITH PORTLANDITE MATRIX / E.M. Chernyshov, N.D. Potamoshneva, M.P. Stepanova , R.V. Lesovik // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. №12. P. 1109-1113.
18. Наноструктурные портландито-алюмосиликатные контактно-конденсационные системы твердения и композиты на их основе / М. П. Степанов [и др.] // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 114-122.
19. Усольцев И.А., Жданов Н.В., Овчаренко Г.И. Разработка технологической линии для производства гиперпрессованного кирпича на известняковом отсеке // Ползуновский альманах. 2018. № 2. С.197-200.
20. Кирпич по технологии гиперпрессования / Ю.В. Сапрыгина, А.А. Потхин, А.В. Тышкевич, Е.А. Андреев // Современный взгляд на изучение актуальных проблем: материалы международной научно-практической конференции. Астрахань, 2017. С. 36-39.

References

1. Yudin L.V., Turchin V.V. Stroitel'nye materialy kontaktnogo tverdeniya na osnove shlakov, zol i gruntov [Building materials of contact hardening based on slags, ashes and

soils]. *Stroitel'nye materialy i izdeliya* = *Building materials and products*, 2010, no. 2, pp. 303-307 (In Russ.).

2. Korenkova S.F., Piyavsky S. A., Sidorenko Yu. V. [Modeling of the processes of preparation of contact-condensation mixture]. *Materialy yubileinoi konferentsii "Uspekhi stroitel'nogo materialovedeniya RAASN"* [Materials of the anniversary conference "Advances in building materials science RAASN"]. Moscow, 2001, pp. 197 - 203 (In Russ.).

3. Nagel A.E., Ovcharenko G.I. Ispol'zovanie kontaktno-kondensatsionnykh materialov pri stroitel'stve osnovanii avtomobil'nykh dorog [The use of contact condensation materials in the construction of foundations of highways]. *Polzunovskii al'manakh* = *Polzunovsky Almanac*, 2018, no. 2, pp. 139-144 (In Russ.).

4. Solomatov V.I. [Building materials science in the third millennium]. *Materialy Sed'mykh Akademicheskikh Chtenii RAASN "Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya"* [Materials of the Seventh Academic Readings of the RAAS "Modern problems of building materials science"]. Belgorod, 2001, pt. 1, pp. 3 - 7 (In Russ.).

5. Sidorenko Yu.V. [The mechanism of creating a contact-condensation bridge between structure-forming elements at the mesoscale level]. *Sovremennye predstavleniya ob investitsionnykh protsessakh i novyestroitel'nye tekhnologii: Trudy seksii "Stroitel'stvo" RIA* [Modern ideas about investment processes and new-building technologies. Proceedings of the Construction section of the RIA]. Moscow, 2004, is. 5, pt. 2, pp.168-178 (In Russ.).

6. Sandrasheva A.O. Kontaktno-kondensatsionnoe tverednie materialov na osnove nizkoosnovnykh gidrosilikatov kal'tsiya [Contact condensation solid materials based on low-basic calcium hydrosilicates]. *Polzunovskii al'manakh* = *Polzunovsky Almanac*, 2017, vol.2, no. 4, pp. 204-208 (In Russ.).

7. Chernyshov E. M., Potamoshneva N.D. [Artificial stone based on crystallization of portlandite]. *Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya "Akademicheskie chteniya RAASN" Materialy k Mezhdunar. konf. Samara* [Modern problems of building materials science "Academic readings of the RAASN". Materials for the Intern. conf.]. Samara, 1995, pp. 20 - 21 (In Russ.).

8. Yudina L.V., Yudin A.V. *Metallurgicheskie i toplivnye shlaki v stroitel'stve* [Metallurgical and fuel slag in construction]. Izhevsk, Udmurtia Publ.; Moscow, *ACB Publ.*, 1995, 160 p. (In Russ.).

9. Glukhovskiy V. D., Runova R. F., Maksunov S. E. *Vyazhushchie i kompozitsionnye materialy kontaktnogo tverdeniya* [Cementing and composite materials of contact hardening]. Kiev, *Vishka shkola Publ.*, 1991, 243 p. (In Russ.).

10. Yuldashbaeva V.F., Gorozhanin V. M., Michurin S. V. [Chemical and mineral composition of tripoli in Cretaceous sediments in the southeast of Bashkortostan]. *Sbornik*

statei "Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana" [Collection of articles "Geology, minerals and geoecology problems of Bashkortostan"]. Ufa, 2018, pp.316-321 (In Russ.).

11. Belov N.V. *Ocherki po strukturnoi mineralogii* [Essays on structural mineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 344 p. (In Russ.).

12. Bokiyy G.B. *Kristallokhimiya* [Crystal chemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 400 p. (In Russ.).

13. Benstein Yu. I., Butt Yu. M., Timashev V.V., Kaverin B. S. [Crystallization of hydrated neoplasms of cement stone on a carbonate substrate]. *Silikaty. Trudy MKhTI* [Silicates. Proceedings of the Moscow Art Theater]. Moscow, 1971, is. LXYIII, pp. 238 - 242 (In Russ.).

14. Potamoshneva N.D., Stepanova M.P. [Optimization of the technology of portlandite-aluminosilicate composite of contact condensation hardening]. *Sbornik statei po materialam 7-i mezhdunarodnoi konferentsii: "Mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugikh stroitel'nykh materialov"* [Collection of articles on the materials of the 7th international conference "The mechanics of the destruction of concrete, reinforced concrete and other building materials"]. 2013, pp. 3-10 (In Russ.).

15. Chernyshov E. M., Potamoshneva N. D., Kukina O. B., Stepanova M. P. [Building composites with contact-condensation nano-, microstructural matrices made of artificial portlandite]. *Materialy XV Akademicheskikh chtenii RAASN – mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials of the XV Academic Readings of RAASN - International Scientific and Technical Conference]. Kazan, 2010, pp. 308-321 (In Russ.).

16. Chernyshov E. M., Stepanova M. P., Potamoshneva N.D. Portlandito-alyumosilikatnye kontaktno-kondensatsionnye sistemy tverdeniya i kompozity na ikh osnove: vozmozhnye mekhanizmy strukturoobrazovaniya [Portlandite-aluminosilicate contact-condensation hardening systems and composites based on them: possible mechanisms of structure formation]. *Nauchnyi vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Bulletin of VGASU. Construction and architecture*, 2012, no. 3 (27), pp. 86-96 (In Russ.).

17. Chernyshov E.M., Potamoshneva N.D., Stepanova M.P., Lesovik R.V. Clinkerless composites with portlandite matrix. *Research Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 9, no. 12, pp. 1109-1113.

18. Stepanova M. P. [et al.]. Nanostrukturnye portlandito-alyumosilikatnye kontaktno-kondensatsionnye sistemy tverdeniya i kompozity na ikh osnove [Nanostructured Portlandite-aluminosilicate contact-condensation hardening systems and composites based on them]. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU*, 2013, no. 2, pp. 114-122 (In Russ.).

19. Usoltsev I.A., Zhdanov N.V., Ovcharenko G.I. Razrabotka tekhnologicheskoi linii dlya proizvodstva giperpressovannogo kirpicha na izvestnyakovom otseve [Development of

a technological line for the production of hyper-pressed brick on limestone screenings]. *Polzunovskii al'manakh* = *Polzunovsky Almanac*, 2018, no. 2, pp.197-200 (In Russ.).

20. Saprygina Yu.V., Potkhin A.A., Tyszkiewicz A.V., Andreev E.A. [Brick by technology of hyperpressure]. *Materialy mezhdunarodnoi nuchno-prakticheskoi konferencii "Sovremennyyi vzlyad na izuchenie aktual'nykh problem"* [Materials of international scientific and practical conference. "A modern look at the study of urgent problems"]. Astrakhan, 2017, pp. 36-39 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Степанова Мария Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: max035@ya.ru

Maria P. Stepanova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: max035@ya.ru

Сотникова Ольга Анатольевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой проектирования зданий и сооружений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: hundred@vgasu.vrn.ru

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, The Head of Department of Desing of Buildings and Structures, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: hundred@vgasu.vrn.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114>

Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой

О.А. Ветрова¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская 95, г. Орёл 302026, Российская Федерация

✉ e-mail: vetrovaoly@mail.ru

Резюме

Цель исследования. На основе экспериментальных данных провести анализ влияния уровня нагружения на деформативность балок со стальной и композитной стеклопластиковой арматурой при длительном действии нагрузки.

Методы. Проведены экспериментальные исследования бетонных изгибаемых элементов двух серий: первая серия армирована композитной стеклопластиковой арматурой класса АСК, вторая серия армирована стальной арматурой класса А400. Исследования экспериментальных образцов проведены при действии длительных нагрузок. В ходе эксперимента производилась выдержка конструкций под нагрузкой нескольких уровней: при расчетной нагрузке, при уровне 1,2 от расчетной нагрузки и при 1,5 от расчетной нагрузки. Выполнялась фиксация деформаций бетона, прогибов экспериментальных балок двух серий.

Результаты. На основе экспериментальных данных установлены зависимости деформаций бетона экспериментальных образцов двух серий от времени при различных уровнях нагружения, зависимости нарастания прогибов от уровня приложения нагрузки, зависимости влияния уровня нагружения элементов на скорость и интенсивность роста деформаций ползучести балок со стеклопластиковой и стальной арматурой. В частности, прогибы всех образцов со стеклопластиковым армированием превысили предельно допустимое значение, тогда как максимальный прогиб железобетонных балок в середине сечения не превышал предельно допустимого значения.

Заключение. На основании полученных данных сделаны выводы о характере и величине длительных деформаций балок со стеклопластиковой и стальной арматурой при различных уровнях длительной нагрузки, что является значимым в практическом смысле при применении бетонных конструкций с композитной арматурой, учитывая малое число данных исследований.

Ключевые слова: железобетонная балка; бетонная балка; композитная стеклопластиковая арматура; деформативность; ползучесть.

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

Для цитирования: Ветрова О.А. Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 103-114. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114>.

Поступила в редакцию 26.11.2019

Подписана в печать 14.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Pilot Studies of Concrete Beams Deformability Reinforced with Composite Reinforcement

Olga A. Vetrova¹ ✉

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev
Komsomol'skaya str. 95, Kursk 302026, Russian Federation

✉ e-mail: aipykhtin@swsu.ru

Abstract

Purpose of research. Analysis is done on the basis of experimental data of loading level impact on deformability of beams with steel and composite fiberglass reinforcement at prolonged loads.

Methods. Experimental studies of concrete bending elements of two series were carried out: the first is reinforced with composite fiberglass reinforcement of ASK class, the second is reinforced with steel reinforcement of A400 class. Studies of experimental samples were carried out under long-term loads. The structures were under different loads during the experiment: at design load, at 1.2 level from design load and at 1.5 from the design load. Concrete deformations and deflections of experimental beams of two series were fixed.

Results. Dependence on time of concrete deformations of experimental samples of two series at different loading levels, dependence of deflection growth on load application level, influence dependence of loading level of elements on speed and intensity of creep deformation growth of beams with fiberglass and steel reinforcement are stated on the basis of experimental data. In particular, the bends of all samples with fiberglass reinforcement exceeded the maximum permissible value, while the maximum deflection of reinforced concrete beams in the middle of the section did not exceed maximum permissible value.

Conclusion. On the basis of the obtained data, conclusions are drawn on the nature and magnitude of long-term deformations of beams with fiberglass and steel reinforcement at different levels of long-term loads. This conclusion is significant in practical sense when using concrete structures with composite reinforcement taking into account a small number of research data.

Keywords: reinforced concrete beam; concrete beam; composite fiberglass fittings; deformability; creep.

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

For citation: Vetrova O. A. Pilot Studies of Concrete Beams Deformability Reinforced with Composite Reinforcement. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 103-114 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114>.

Received 26.11.2019

Accepted 14.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Одним из направлений развития теории и практики железобетонных конструкций является повышение их коррозионной стойкости при воздействии агрессивных сред. Это обусловлено необ-

ходимостью повышения ресурса конструктивной безопасности и, следовательно, увеличения срока службы зданий и сооружений. Одним из путей решения проблемы коррозионной стойкости железобетонных конструкций явля-

ется частичное или полное замещение в железобетонных элементах стальной арматуры на другие (неметаллические) виды армирования. Исследования бетонных элементов, усиленных композитными видами арматуры, ведутся с 60-х годов прошлого столетия, однако активное производство и внедрение в строительную практику композитных видов арматуры началось в последние два десятилетия. Связанно это было, в том числе, с отсутствием законодательной базы и нормативно-технических документов в области применения композитной арматуры в строительстве. Отдельный нормативный документ по проектированию конструкций, армированных композитной арматурой¹, был утвержден лишь в 2017 г. В последнее десятилетие исследование таких конструкций проводится достаточно активно многими коллективами авторов² [1–11].

Рост производства и применения композитной арматуры базируется на определенных физико-механических преимуществах (высокая прочность, коррозионная стойкость, диамагнитность, неэлектропроводность и т. д.). Однако замена стальной арматуры на композитную (как предлагают некоторые произ-

водители) в массовых железобетонных конструкциях ограничивается из-за снижения прочности композитной арматуры при температурном воздействии, а также из-за низкого по сравнению со сталью модуля упругости.

В основе расчета бетонных конструкций, армированных композитной арматурой^{1,3,4}, лежит принцип расчета железобетонных конструкций с введением расчетных коэффициентов, учитывающих особенности поведения композитной арматуры под нагрузкой. Задачами дальнейших исследований в данном случае [8] является учет особенностей сцепления арматуры с бетоном, а также дальнейшее проведение экспериментально-теоретических исследований, в том числе для выявления особенностей напряженно-деформированного состояния конструкций при длительном нагружении.

Большинство современных исследований направленно на изучение поведения композитбетонных конструкций при кратковременном действии нагрузок [1, 3–5, 9, 10], лишь незначительное количество работ посвящено учету длительности действия нагрузки при исследовании НДС изгибаемых элементов [12, 13]. Так, в частности, в работе [13]

¹ СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования / Минстрой России. М., 2017. 52 с.

² Fico R. Limit states design of concrete structures reinforced with FRP bars: PhD thesis / University of Naples Federico II, Napoli, 2008, 167 p.

³ JSCE, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers, 1997.

⁴ ACI 440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, 2012.

приводятся результаты экспериментальных исследований балок со стеклопластиковой и базальтопластиковой арматурой, без сравнения их поведения под нагрузкой с аналогами из железобетона.

В настоящей работе в развитие [14] приводятся результаты экспериментальных исследований деформативности балок, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой при действии длительных нагрузок. Основная цель работы – анализ влияния уровня нагружения на деформативность балок со стальной и стеклопластиковой арматурой при длительном действии нагрузки.

За основу при теоретических исследованиях деформативности испытуемых балок взят принцип расчета по деформационной модели Г.А. Гениева [15, 16]. В основу этой модели положен энергетический подход к переходу от эталонных диаграмм сжатия бетона к диаграммам неоднородного деформирования.

Материалы и методы

В рамках экспериментальных исследований выполнялись испытания опытных образцов – однопролетных бетонных балок с конструктивными размерами 60x120x1200 мм со стеклопластиковой (серия БСК) и стальной (серия БСС) арматурой. Бетон образцов класса В20; армирование выполнено плоскими вязанными симметричными каркасами с рабочей арматурой из стержней Ø4 мм класса АСК (серия БСК) и Ø6 мм класса А400 (серия БСС).

Поперечное армирование выполнено вертикальными хомутами из стержней Ø4 мм класса АСК (серия БСК) и Ø4 мм класса Вр500 (серия БСС). Фиксация арматурного каркаса в проектом положении осуществлялась при помощи фиксаторов защитного слоя бетона. Конструкции были изготовлены в заводских условиях методом опалубочного формования.

Однопролётные экспериментальные балки свободно опирались на опорах. Нагружение проводилось сосредоточенными силами в одной трети пролета. Схема приложения нагрузки при испытании экспериментальных конструкций, схема армирования и сечения балок представлены на рис. 1.

Испытания экспериментальных балок проводились в 2018-2019 гг. в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-94. Возраст нагружаемых образцов на момент начала испытания составил один год, условия хранения образцов – в отапливаемом тёплом помещении. Загружение образцов производилось гравитационным методом с использованием штучных грузов, что позволило обеспечить стабильность нагрузки во времени.

Экспериментальные образцы в зависимости от уровня нагрузки при длительном нагружении были поделены на серии следующим образом:

– серия 1: образцы со стальным (БСС-1) и композитным (БСК-1) армированием, выдерживаемые под нагрузкой $P = 1,0 \cdot P_{расч}$;

– серия 2: образцы со стальным (БСС-2) и композитным (БСК-2) армированием, выдерживаемые под нагрузкой $P = 1,2 \cdot P_{расч}$;

– серия 3: образцы со стальным (БСС-3) и композитным (БСК-3) армированием, выдерживаемые под нагрузкой $P = 1,5 \cdot P_{расч}$.

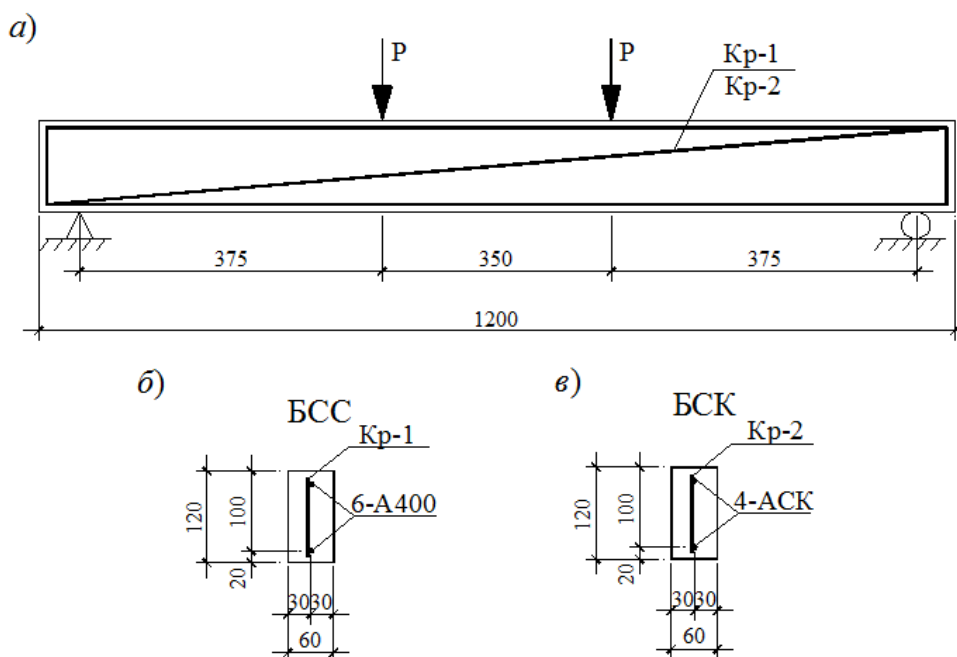


Рис. 1. Схема армирования экспериментальных балок: **а** – расчётная схема конструкции; **б** – поперечное сечение образцов со стальной арматурой типа БСС; **в** – поперечное сечение образцов со стеклопластиковой арматурой типа БСК

Fig. 1. Reinforcement diagram of experimental beams: **a** – design diagram of the structure; **б** – cross section of samples with steel reinforcement of BSS type; **в** – cross section of samples with fiberglass reinforcement of BSK type

Общий вид испытанных образцов представлен на рис. 2.

Приложение длительной нагрузки осуществлялось через специальную traversу в течение 30 суток, при этом показания приборов снимались каждые 4 суток (96 часов). Прогибы фиксировались с помощью индикаторов часового типа МИГ-1, ИЧ-25 с ценой деления 0,01 мм и диапазоном измерения до 25 мм. Механические приборы крепились на специальном держателе, расположенном на неподвижной опоре.

Результаты и их обсуждение

В результате испытаний образцов были получены следующие данные в зависимости от прикладываемого усилия $P_{нагр}$: изгибающий момент M , прогибы f до момента длительных испытаний и во время них; деформации бетона в середине пролёта ε_b . Развитие деформаций бетона ε_b в зависимости от вида армирования и величины загрузки представлены в виде диаграмм (рис. 3).



а)



б)

Рис. 2. Общий вид образцов типа БСС (со стальной арматурой) (а) и типа БСК (со стеклопластиковой арматурой) (б) после испытания

Fig. 2. General view of samples of type БСС (with steel reinforcement) (а) and type БСК (with fiberglass reinforcement) (б) after the test

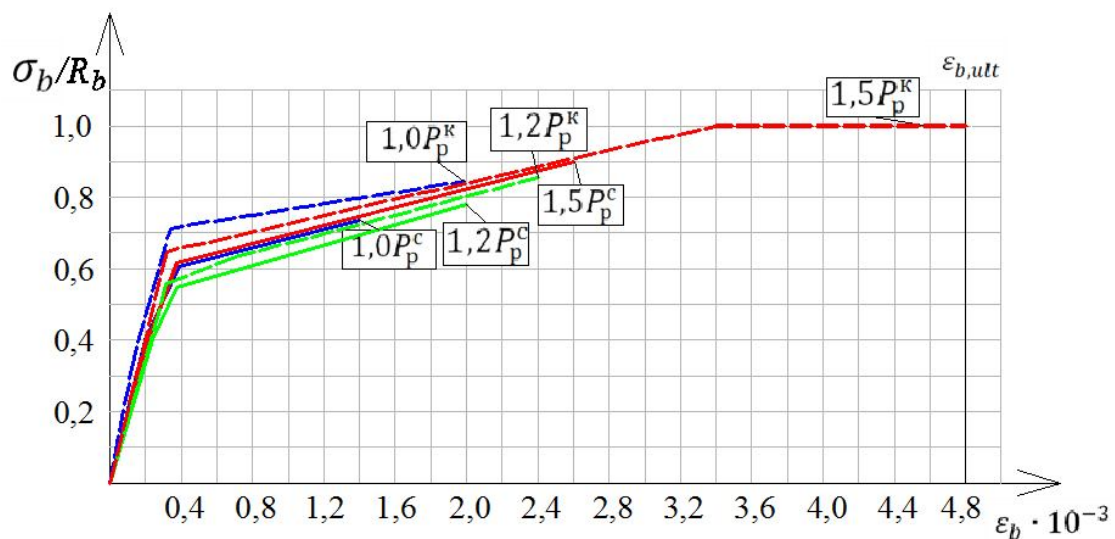


Рис. 3. Диаграммы $\sigma_b - \varepsilon_b$ при различном уровне нагружения образцов

Fig. 3. Charts $\sigma_b - \varepsilon_b$ at different sample loading levels

Для всех образцов балок диаграммы деформирования имеют двухлинейный вид. Характер деформирования образцов, армированных стеклопластиком, схож с железобетоном. Деформации бетона сжатой зоны образцов с композитом значительно больше, чем в железобетонных образцах. При нагружении нагрузкой $1,5 \cdot P_{расч}$, зафиксировано достижение бетоном предельных деформаций у образца 3 серии БСК-3.

Диаграммы развития деформаций при постоянной нагрузке представлены на рис. 4. У всех образцов в течение 30 суток происходит нарастание деформаций, проявляется ползучесть материалов, однако наибольший рост наблюда-

ется в первые 12 суток. Характер нарастания деформаций во времени у образцов с композитом и сталью схож, при этом величина деформаций у первых выше. Скорость и величина ползучести значительным образом зависит от процента загрузки образцов. Так при выдержке балок 3 серии под нагрузкой $1,5 \cdot P_{расч}$ нарастание деформаций происходит наиболее выражено и достигает предельных деформаций бетона сжатой зоны. Стоит также отметить, что наиболее интенсивный рост деформаций происходит в первые 12 суток (288 часов) с момента начала длительных испытаний, далее процесс ползучести замедляется и носит затухающий характер.

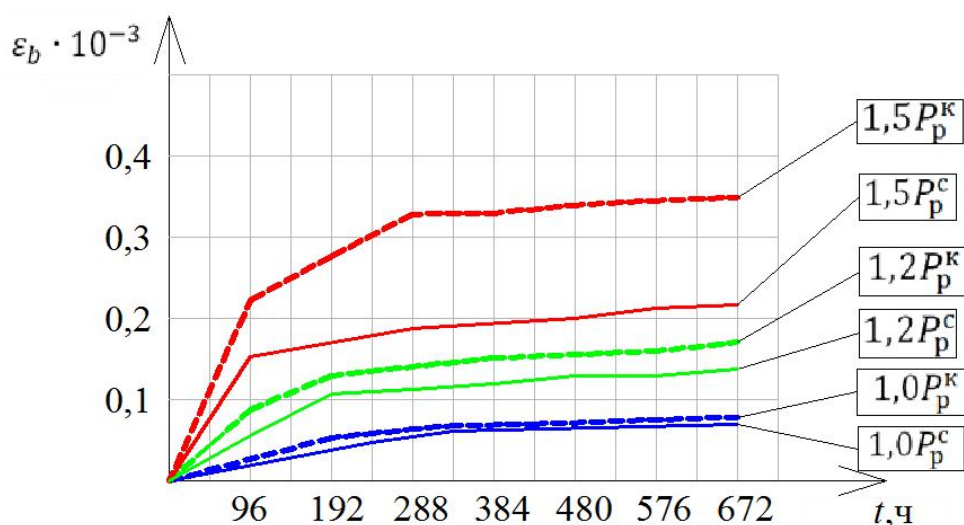


Рис. 4. Зависимости деформаций бетона от времени при различных уровнях нагружения

Fig. 4. Dependence of concrete deformations on time at various loading levels

Анализ представленной зависимости позволяет сделать вывод, что у бетонных балок со стеклопластиковым армированием ползучесть выше. Это можно объяснить повышенной деформативностью композитного армирующего материала.

Развитие прогибов в середине пролета образцов в зависимости от прикладываемого усилия представлено в виде зависимости « $M - f$ » на рис. 5.

Первый участок характеризуется тем, что нарастание прогибов происходит линейно, пропорционально приклады-

ваемому усилию. Далее происходит перелом диаграммы, что обуславливается нелинейностью деформаций бетона и снижением жесткости сечения за счет образования трещин. Рост прогибов происходит при незначительном увеличении нагрузки.

Прогибы всех образцов со стеклопластиковым армированием превысили

предельно допустимое значение $f_{ult} = 10$ мм. Стоит также отметить, что на протяжении всей экспериментальной части при испытании образцов с композитом, нарастание прогибов сопровождалось потрескиванием, а нарастание прогибов образцов со стальным армированием происходило равномерно без резких скачков.

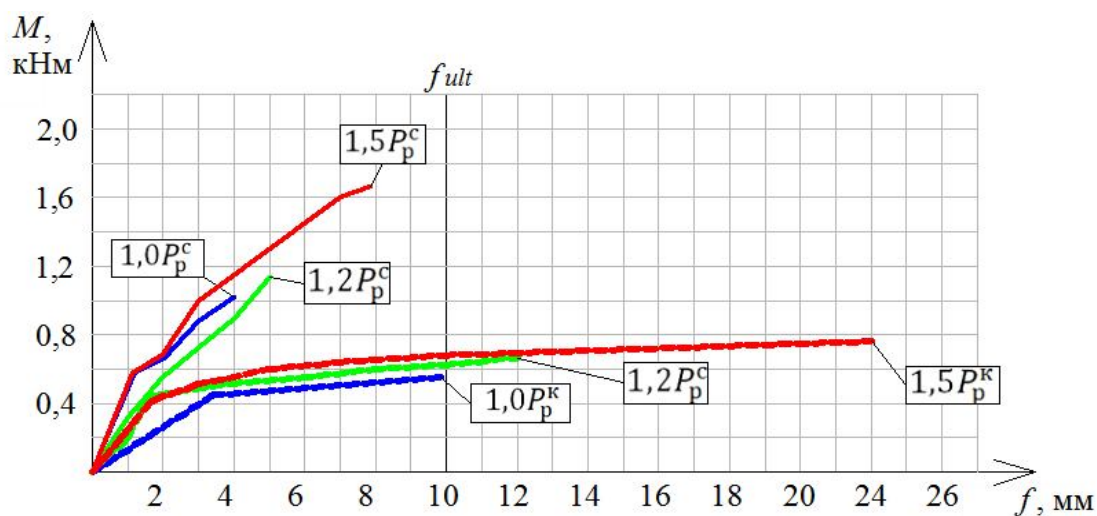


Рис. 5. Зависимость « $M - f$ » испытываемых образцов

Fig. 5. Dependence « $M - f$ » test sample

Максимальный прогиб железобетонных балок в середине сечения не превышал предельно допустимого значения. При сравнении прогибов бетонных балок с композитным БСК и стальным армированием БСС, у балок типа БСК прогиб больше практически в 3 раза.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований деформативности бетонных балок со стеклопластиковым армированием можно сделать следующие выводы:

- характер деформирования образцов со стальным и композитным арми-

рованием схож между собой. Чем выше процент прикладываемой нагрузки, тем сильнее деформирование балок;

- деформативность образцов со стеклопластиком на порядок выше. При нагрузке, равной $1,5 \cdot P_{расч}$, деформативность бетона сжатой зоны достигает предельных значений $\varepsilon_{b,ult}$;

- при выдержке бетонных балок под постоянной нагрузкой было зафиксировано нарастание деформаций, вызванных ползучестью материала. Мера ползучести образцов со стеклопластиковой арматурой типа БСК выше. Нарастание и конечная величина ползучести зависит от процента нагружения

и времени выдержки образцов под нагрузкой;

– прогиб балок со стеклопластиковой арматурой достигает максимально допустимого значения при нагрузке порядка 80% от расчетной, в то время как в балках со стальной арматурой прогиб

не превышал максимально допустимых значений на протяжении всего нагружения. Максимальный прогиб балок при уровне нагружения в $1,5 \cdot P_{\text{расч}}$ со стеклопластиковым армированием типа БСК в 3 раза больше, чем у балок со стальной арматурой.

Список литературы

1. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматуры // Известия КГАСУ. 2014. №3. С. 7-13.
2. Габрусенко В.В. Особенности проектирования конструкций из бетона с композитной арматурой // Проектирование и строительство в Сибири. 2013. №6. С. 20-24.
3. Моргунов М.В., Копелиович Д.И. Экспериментальные исследования деформирования бетонной балки армированной стеклопластиковой арматурой // Инновации и инвестиции. 2019. № 4. С. 278-281.
4. Медянкин М.Д., Фаизова А.Т. Испытание бетонных элементов, армированных композитной неметаллической арматурой, на действие изгибающей нагрузки. Анализ полученных результатов // Материалы 10 Международной научно-практической конференции International innovation research. Пенза, 2017. С. 45-47.
5. О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями / А.А. Пискунов, Т.А. Зиннуров, Д.В. Бережной, Б.Ш. Умаров, А.Р. Вольтер // Транспортные сооружения: интернет-журнал. 2018. №2. URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02SATS218
6. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы – как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2012. №4 (ч. 2). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
7. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю. Неметаллическая композитная арматура для бетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 45-47.
8. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №5. С.38-43.
9. Тур В.В., Малыха В.В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2013. № 8. С. 58-65.

10. Фролов Н.В., Смоляго Г.А., Полоз М.А. Экспериментальные исследования образцов армобетонных балок с различным содержанием в растянутой зоне стержней стеклопластиковой арматуры // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 60-64.
11. Ветрова О.А., Семенихин И.О. Проблемы применения неметаллической арматуры и разработка методики экспериментальных исследований бетонных балок, усиленных стеклопластиковой арматурой // Наука и инновации в строительстве (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): сборник докладов международной научно-практической конференции: в 2 т. Белгород, 2017. С. 33-37.
12. Gross S. , Yost J., Kevgas G. Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads // High Performance Materials in Bridges, American Society of Civil Engineers. 2003. P. 451-462.
13. Антаков А.Б. Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой при длительном приложении нагрузки // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР-2016. Чебоксары, 2016. С. 67 – 72.
14. Берестов А.Е., Крохин А.А., Ветрова О.А. Экспериментальное исследование длительной прочности и деформативности балок с композитным армированием // Материалы VIII международной научно-практической конференции «Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная». Брянск, 2019. С. 78-81.
15. Гениев Г. А. Практический метод расчета длительной прочности бетона // Бетон и железобетон. 1995. №4. С. 25-27.
16. Никулин А.И., Колчунов В.И. Применение энергетических соотношений при построении расчетной модели для определения несущей способности сечений изгибаемых железобетонных элементов // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2005. № 4. С. 99.

References

1. Antakov A.B., Antakov I.A. Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh elementov s polimerkompozitnoi armaturoy [Experimental studies with bent elements polimerkompozitnoy fittings]. *Izvetiya KGASU = News of the KSUAE*, 2014, no.3, pp. 7-13 (In Russ.).
2. Gabrusenko V.V. Osobennosti proektirovaniya konstruktsii iz betona s kompozitnoi armaturoi [Features of structural design of concrete with composite rebar]. *Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri = Design and construction in Siberia*, 2013, no.6, pp. 20-24 (In Russ.).
3. Morgunov M.V., Kopeliovich D.I. Eksperimental'nye issledovaniya deformirovaniya betonnoi balki armirovannoi stekloplastikovoii armaturoi [Experimental study of deformation of reinforced concrete beam with glass fiber reinforced plastic reinforcement].

mation of concrete beam reinforced fiberglass reinforcement]. *Innovatsii i investitsii = Innovation and investment*, 2019, no. 4, pp. 278-281 (In Russ.).

4. Medyankin M.D., Faizova A.T. [Testing of concrete elements reinforced by non-metallic composite reinforcement to the action of the bending load. Analysis of results]. *Materialy 10 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "International innovation research"* [Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "International innovation research"]. Penza, 2017, pp. 45-47 (In Russ.).

5. Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Berezhnoj D.V., Umarov B.Sh., Vol'ter A.R. O rezul'tatakh eksperimental'nogo i chislennogo issledovaniia napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya betonnykh konstruktssii, armirovannykh predvaritel'no napryazhennymi polimerkompozitnymi sterzhnyami [On the results of experimental and numerical investigations of stress-strain state of concrete structures, prestressed reinforced rods polimerkompozitnymi]. *Internet-zhurnal "Transportnye sooruzheniya" = Internet magazine "Transport structures"*, 2018, no.2. (In Russ.). Available at: <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf> (dostup svobodnyj). DOI: 10.15862/02SATS218.

6. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R. Kompozitnye materialy – kak osnova effektivno-sti v stroitel'stve i rekonstruktsii zdaniy i sooruzhenii [Composite materials - as the basis of efficiency in the construction and reconstruction of buildings and structures]. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineers Don Gazette*, 2012, no.4 (chast' 2). (In Russ.). Available at: URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307.

7. Stepanova V.F., Stepanov A.Yu. Nemetallichesкая kompozitnaya armatura dlya betonnykh konstruktssii [Non-metallic composite reinforcement for concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*, 2013, no. 1, pp. 45-47 (In Russ.).

8. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elementy teorii razvitiya betonnykh konstruktssii s nemetallicheskoj kompozitnoi armaturoi [Elements of the theory of concrete structures with non-metallic composite armature]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*, 2015, no.5, pp. 38-43 (In Russ.).

9. Tur V.V., Malyha V.V. Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh betonnykh elementov s kombinirovannym armirovaniem stal'nymi i stekloplastikovymi sterzhnyami [Experimental studies of bent concrete elements with a combined reinforcement steel and fiberglass rods]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki = Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied*, 2013, no. 8, pp. 58-65 (In Russ.).

10. Frolov N.V., Smolyago G.A., Poloz M.A. Eksperimental'nye issledovaniya obraztsov armobetonnykh balok s razlichnym sodержaniem v rastyanutoi zone sterzhnei stekloplastikovo armatury [Experimental studies of samples armobetonnyh beams with different content in a stretched zone rods fiberglass reinforcement]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2017, no. 1, pp. 60-64 (In Russ.).

11. Vetrova O.A., Semehin I.O. [Problems of application of non-metallic reinforcement and development of methods of experimental research of concrete beams reinforced with fiberglass reinforcement]. *Nauka i innovacii v stroitel'stve (k 45-letiyu kafedry stroitel'stva i gorodskogo hozyajstva). Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. [Science and innovation in construction. Proceedings of the international scientific-practical conference]. Belgorod, 2017, pp. 33-37 (In Russ.).*
12. Gross S., Yost J., Kevgas G. Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads. *High Performance Materials in Bridges, American Society of Civil Engineers*, 2003, pp. 451-462.
13. Antakov A.B. Antakov I.A. [Experimental studies with bent elements polimerkompozitnoy valve for prolonged application of a load]. *Novoe v arhitekture, proektirovanii stroitel'nykh konstrukcij i rekonstrukcii. Materialy III Mezhdunarodnoj (IX Vserossijskoj) konferencii NASKR–2016 [The new architecture, structural design and renovation. Materials of the III International (IX All-Russian) Conference NASKR–2016]. CHEboksary, 2016, pp. 67 – 72 (In Russ.).*
14. Berestov A.E., Krohin A.A., Vetrova O.A. [Experimental study of long-term strength and deformability of beams with composite reinforcement]. *Materialy VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Sreda, okruzhayushchaya cheloveka: prirodnaya, tekhnogennaya, social'naya" [Proceedings of the VIII International scientific-practical conference "The human environment: natural, technological, social]. Bryansk, 2019, pp. 78-81 (In Russ.).*
15. Geniev G. A. Prakticheskii metod rascheta dlitel'noi prochnosti betona [A practical method for calculating the long-term durability of concrete]. *Beton i zhelezobeton = Concrete and reinforced concrete*, 1995, no.4, pp. 25-27 (In Russ.).
16. Nikulin A.I., Kolchunov V.I. Primenenie energeticheskikh sootnoshenii pri postroenii raschetnoi modeli dlya opredeleniya nesushchei sposobnosti sechenii izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [The use of power relations in the construction of the computational model to determine the bearing capacity of the cross sections of bent reinforced concrete elements]. *Vestnik central'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nykh nauk = Bulletin of the Central Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*, 2005, no. 4, 99 p. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Ветрова Ольга Анатольевна,
доцент кафедры строительных конструкций
и материалов, ФГБОУ ВО «Орловский
государственный университет им. И.С. Тургенева»,
г. Орёл, Российская Федерация,
e-mail.ru: vetrovaoly@mail.ru

Olga A. Vetrova, Associate Professor,
Department of Building Structures and Materials,
Orel State University named after
I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation,
e-mail: vetrovaoly@mail.ru

Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора

М.В. Бобырь¹ ✉, Н.А. Милостная¹, В.А. Булатников¹, М.Ю. Лунева¹

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. В процессе работы робота-манипулятора из-за дребезга контактов часто возникают ситуации, которые уменьшают точность позиционирования его звеньев. Одним из вариантов решения этой проблемы является фильтрация сигнала. Современные алгоритмы цифровой фильтрации обладают достаточно сложной математической структурой. На обработку данных в таких фильтрах требуется много времени, поэтому целью данной работы является разработка быстродействующего устройства нечеткого цифрового фильтра, способного устранить проблему дребезга контактов при позиционировании звеньев робота-манипулятора.

Методы. При разработке устройства цифрового фильтра использовалась обобщенная математическая модель, реализуемая с применением теории нечеткой логики. Обобщенная математическая модель нечеткого цифрового фильтра включает модель, определяющую суппорт нечеткой выходной переменной, модель определения коэффициентов нечеткого цифрового фильтра, и модель преобразования выходного напряжения в угол поворота сервопривода робота-манипулятора. В совокупности данная математическая модель позволяет перерассчитать напряжение, которое поступает на вход нечеткого цифрового фильтра с помощью двух коэффициентов регулирования, тем самым улучшая точность позиционирования звеньев робота-манипулятора.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований проводился сравнительный анализ разработанного быстродействующего устройства нечеткого цифрового фильтра с фильтром Калмана. Проводился расчет среднеквадратической ошибки RMSE для двух фильтров. При этом среднее значение RMSE у нечеткого цифрового фильтра составило 0,0185, у фильтра Калмана - 0,0193.

Заключение. В статье рассмотрена обобщенная математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра, состоящая из трех моделей. Представлено устройство, реализующее определение суппорта нечеткой выходной переменной, экспериментальная модель робота-манипулятора, экспериментальные исследования предлагаемой математической модели.

Ключевые слова: нечеткий цифровой фильтр; фильтр Калмана; дефаззификация; суппорт нечеткого множества.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-19-00186.

Для цитирования: Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, В.А. Булатников, М.Ю. Лунева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 115-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>.

Поступила в редакцию 19.12.2019

Подписана в печать 11.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator

Maksim V. Bobyr¹ ✉, Natalia A. Milostnaya¹, Valentine A. Bulatnikov¹,
Marina Yu. Luneva¹

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. Situations that reduce the accuracy of links positioning often arise due to the drab of contacts during the operation of robot manipulator. One of this problem solutions is signal filtering. Modern digital filtering algorithms have a rather complex mathematical structure. Data processing in such filters takes long time. So the purpose of this work is to develop fast-acting fuzzy digital filter device capable to eliminate the problem of contact scrapping when positioning the links of robot manipulator.

Methods. Generalized mathematical model was used in the development of digital filter device. This model is implemented by using fuzzy logic theory. Generalized mathematical model of the fuzzy digital filter includes a model determining a support of fuzzy output variable, a model for determining coefficients of fuzzy digital filter and a model for converting the output voltage into a rotation angle of robot manipulator servo drive. This mathematical model makes it possible to recalculate the voltage supplied to the input of fuzzy digital filter using two control coefficients thereby improving the positioning accuracy of robot manipulator links.

Results. During experimental studies, comparative analysis of developed fast-acting device of fuzzy digital filter with Kalman filter was carried out. The RMSE standard error for two filters was calculated. The average RMSE value of the fuzzy digital filter was 0.0185 of Kallman's filter was 0.0193.

Conclusion. Generalized mathematical model of fuzzy digital filter device consisting of three models is described. Device implementing determination of caliper of fuzzy output variable, experimental model of robot manipulator, experimental research and proposed mathematical model are presented.

Keywords: fuzzy digital filter; Kallman's filter; defuzzification; caliper of fuzzy set.

Conflict of Interest: The authors declare no apparent or potential conflict of interest related to the publication of this article.

Funding: This work was supported by the State Assignment and a grant of the Russian Science Foundation No. 16-19-00186.

For citation: Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A, Luneva M. Yu. Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 115-129 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>.

Received 19.12.2019

Accepted 11.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Для автоматизации технологических процессов производства применяются роботы-манипуляторы. Точность позиционирования звеньев робота-манипулятора во многом определяет его эксплуатационные возможности [1, 2]. Часто возникают ситуации, когда из-за дребезга контактов – многократных неконтролируемых замыканий и размыканий контактов робот начинает двигаться прерывисто. Этот факт уменьшает точность позиционирования его звеньев. Решением данной проблемы является использование цифровой фильтрации. В настоящее время самым известным является фильтр Калмана. Он применяется для повышения точности позиционирования различных устройств. Например, для улучшения позиционирования мобильной платформы, на которой установлен GPS-сенсор, принимающий геодезические координаты фильтр Калмана корректирует сигнал, полученный от GPS-сенсора [3]. Для управления ориентацией космического аппарата фильтр Калмана корректирует зашумленные показания звездного датчика [4]. Для комплексирования данных от датчиков физических величин мобильного робота используется расширенный фильтр Калмана [5]. Фильтр Калмана имеет достаточно сложную реализацию, благодаря чему требуется много времени на обработку и хранение данных. В связи с этим в работе [6] авторы предлагают нечеткий цифровой фильтр. В данной работе рассматрива-

ется математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра, которая рассчитывает суппорт нечеткой выходной переменной, определять выходное напряжение и преобразовывать его в угол поворота сервопривода. В совокупности математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра позволяет устранить дребезг контактов, тем самым улучшить точность позиционирования звеньев робота-манипулятора.

Материалы и методы

Нечеткий цифровой фильтр применяется для стабилизации перемещения звеньев робота-манипулятора. Подробно принцип работы данного устройства изложен в работе [6]. Обобщенная математическая модель ($M_{\text{НЦФ}}$) устройства нечеткого цифрового фильтра в теоретико-множественном описании задается в виде кортежа по формуле:

$$M_{\text{НЦФ}} = f(M_{\text{СНП}}; M_{\text{РВН}}; M_{\text{ПР}}), \quad (1)$$

где $M_{\text{К}}$ – математическая модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной; $M_{\text{РВН}}$ – математическая модель расчета выходного напряжения; $M_{\text{ПР}}$ – модель преобразования выходного напряжения в угол поворота сервопривода.

Математическая модель $M_{\text{СНП}}$ (формула (2)) позволяет находить суппорт выходной нечеткой переменной:

$$M_{\text{СНП}} = f(\alpha_{\min}; \alpha_{\max}). \quad (2)$$

На рис. 1 представлено устройство определения суппорта нечеткой выходной переменной.

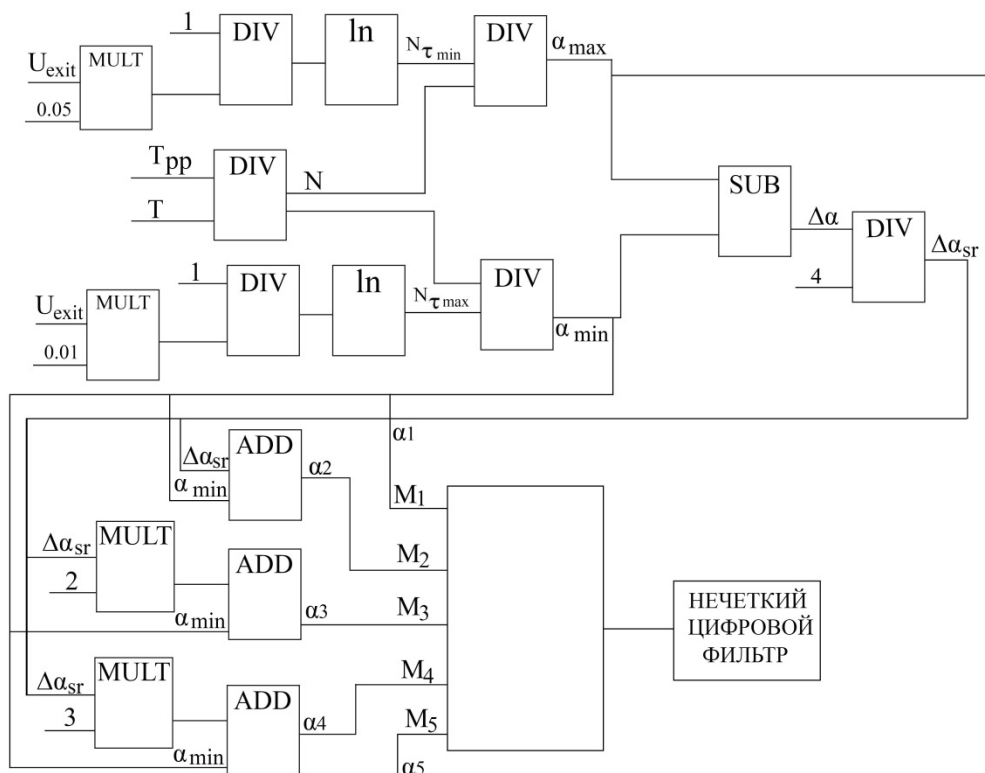


Рис. 1. Устройство нахождения меток выходной переменной

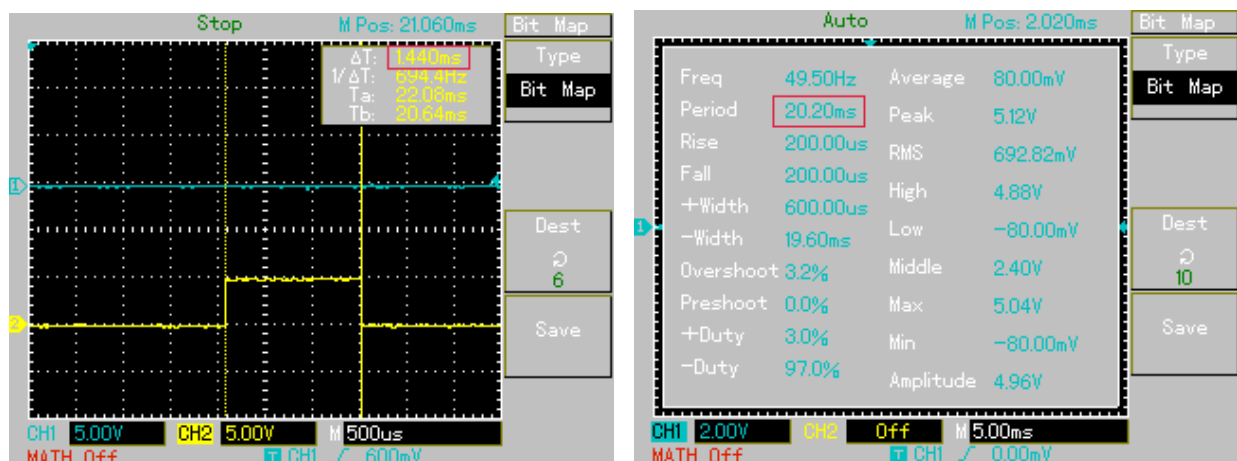
Fig. 1. Device for output variable labels

Математическая модель $M_{\text{СНП}}$ и принцип работы, реализующего ее устройства состоит из 6 шагов.

Шаг 1. Осуществляется нахождение коэффициента выборки N по формуле

$$N = \frac{T_{\text{III}}}{T} = \frac{20.2}{1.44} = 14.028, \quad (3)$$

где T – время одного импульса; T_{III} – период следования импульса (50 Гц). Экспериментально было установлено, что $T=1,44$ мс, $T_{\text{III}}=20,2$ мс (рис. 2).

Рис. 2. Показания осциллографа, определяющие параметры T и T_{III} Fig. 2. Oscilloscope readings determining T and T_{III} parameters

Шаг 2. Расчет минимального и максимального коэффициента точности цифрового фильтра $N_{\min}$ и $N_{\max}$ по формуле:

$$N_{\min} = \ln\left(\frac{1}{5\%U_{\text{ВЫХ}}}\right) = 1.386,$$

$$N_{\max} = \ln\left(\frac{1}{0.01\%U_{\text{ВЫХ}}}\right) = 7.6, \quad (4)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – максимальный выходной сигнал на выходе микроконтроллера ($U_{\text{ВЫХ}} = 5\text{В}$).

Шаг 3. Расчет минимального и максимального значения коэффициента $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$ (5) (рис. 3):

$$\alpha_{\min} = \frac{N_{\max}}{N} = 0,51;$$

$$\alpha_{\max} = \frac{N_{\min}}{N} = 0,91; \quad (5)$$

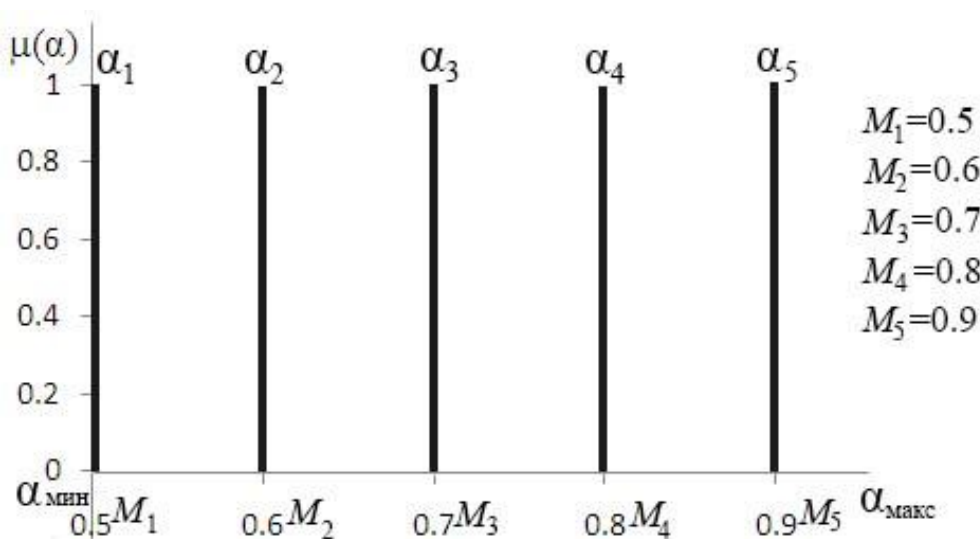


Рис. 3. График выходной функции принадлежности

Fig. 3. Schedule of output membership function

Шаг 4. Нахождение $\Delta\alpha_{sr}$ разности между минимальным и максимальным значениями коэффициента α по формуле

$$\Delta\alpha_{sr} = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{4}. \quad (6)$$

Шаг 6. Расчет меток выходной функции принадлежности по формуле (рис. 3):

$$\alpha_i = n \cdot \Delta\alpha_{sr} + \alpha_{\min};$$

$$M_1 = \alpha_{\min};$$

$$M_2 = \Delta\alpha + \alpha_{\min};$$

$$M_3 = \Delta\alpha \cdot 2 + \alpha_{\min};$$

$$M_4 = \Delta\alpha \cdot 3 + \alpha_{\min};$$

$$M_5 = \alpha_{\max}, \quad (7)$$

где n – номер термина.

Математическая модель расчета выходного напряжения $M_{\text{РВН}}$ включает в себя 7 шагов.

Шаг 1. Нахождение $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$ для формирования суппорта нечеткой выходной переменной по формуле (5) (рис.3).

Шаг 2. Формирование степеней истинности входных переменных. Первая входная переменная ΔU – разница между текущим и предыдущим значениями напряжения, полученного от потенциометра. ΔU определяется по формуле

$$\Delta U = U_{\text{тек}} - U_{\text{пред}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{тек}}$, $U_{\text{пред}}$ – текущее и предыдущее значения напряжений, полученные от потенциометров.

Первая входная переменная состоит из трех термов $\Delta U = (\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3)$, которые определяются по формулам (9) (рис. 4) [7-10].

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \begin{cases} \frac{b_u - \Delta U}{b_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U \leq b_u; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \\ \Delta U_2 &= \begin{cases} \frac{\Delta U}{b_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U \leq b_u; \\ \frac{c_u - \Delta U}{b_u}, & \text{если } b_u \leq \Delta U \leq c_u; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \\ \Delta U_3 &= \begin{cases} \frac{\Delta U - b_u}{b_u}, & b_u \leq \Delta U \leq c_u; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

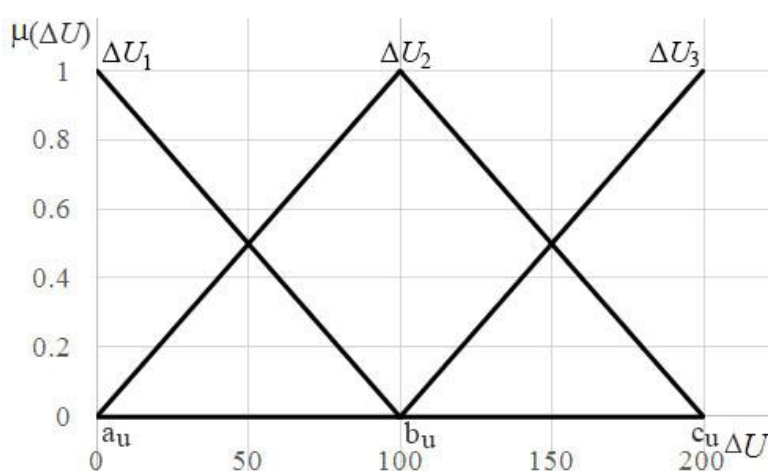


Рис. 4. График функции принадлежности для первой входной переменной

Fig. 4. Membership function graph for the first input variable

Вторая входная переменная – время поворота звеньев робота-манипулятора из минимального положения в максимальное t . Вторая входная переменная состоит из трех термов $t = (t_1, t_2, t_3)$, определяющихся по формулам (рис. 5):

$$\begin{aligned} t_1 &= \begin{cases} \frac{b_t - t}{b_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \\ t_2 &= \begin{cases} \frac{t}{b_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ \frac{c_t - t}{b_t}, & \text{если } b_t \leq t \leq c_t; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \end{aligned}$$

$$t_3 = \begin{cases} \frac{t - b_t}{b_t}, & b_t \leq t \leq c_t; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (10)$$

Шаг 2. Определение базы правил для управления нечеткого цифрового фильтра (табл. 1).

Шаг 3. Расчет степеней истинности предпосылок нечетких правил по формулам [11-16]:

$$\begin{aligned} R1 &= \min(\Delta U_1; t_1), R2 = \min(\Delta U_1; t_2), \\ R3 &= \min(\Delta U_1; t_3), R4 = \min(\Delta U_2; t_1), \\ R5 &= \min(\Delta U_2; t_2), R6 = \min(\Delta U_2; t_3), \\ R7 &= \min(\Delta U_3; t_1), R8 = \min(\Delta U_3; t_2), \\ R9 &= \min(\Delta U_3; t_3), \end{aligned} \quad (11)$$

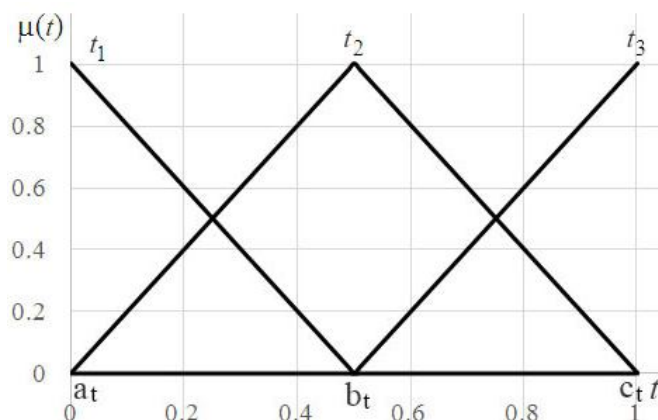


Рис. 5. График функции принадлежности для второй входной переменной

Fig. 5. Membership function graph for second input variable

Таблица 1. Нечеткие правила для работы нечеткого цифрового фильтра

Table 1. Fuzzy rules for the operation of a fuzzy digital filter

	U_1	U_2	U_3
t_1	R1	R4	R7
t_2	R2	R5	R8
t_3	R3	R6	R9

Шаг 4. Нахождение степеней истинности заключений нечетких правил. Определяются с помощью операции нахождения максимумов по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= R9, \alpha_4 = \max(R8; R6), \\ \alpha_3 &= \max(R7; R5; R3), \\ \alpha_2 &= \max(R4; R2), \alpha_1 = R1. \end{aligned} \quad (12)$$

Шаг 5. Дефаззификация, при которой осуществляется расчет четкого значения коэффициента нечеткого цифрового фильтра α по формуле [17-20]:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i} = \frac{\alpha_1 \cdot M_1 + \alpha_2 \cdot M_2 + \dots + \alpha_n \cdot M_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}. \quad (13)$$

Шаг 6. Нахождение коэффициента регулирования β по формуле:

$$\beta = 1 - \alpha. \quad (14)$$

Шаг 7. Расчет выходного напряжения, передаваемого на сервоприводы по формуле:

$$U_{\text{фильтр}} = \alpha \cdot U_{\text{пред}} + \beta \cdot U_{\text{тек}}. \quad (15)$$

Математическая модель преобразования выходного напряжения в угол поворота сервопривода $M_{\text{пр}}$ состоит из 2 шагов:

Шаг 1. Нахождение выходного напряжения $U_{\text{фильтр}}$ по формуле (16).

Шаг 2. Преобразование, полученного напряжения с помощью нечеткого цифрового фильтра в угол поворота передаваемого от микроконтроллера на сервоприводы по формуле:

$$\varphi = \frac{(U_{\text{фильтр}} - I_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_{\min})}{(I_{\max} - I_{\min}) + U_{\min}}, \quad (16)$$

где φ – угол поворота сервопривода, $U_{\text{фильтр}}$ – значение выходного напряжения, полученное по формуле (14), $I_{\min}$, $I_{\max}$ – минимальное и максимальное значения выходного напряжения 0 и 1024, $U_{\max}$, $U_{\min}$ – максимальное и ми-

нимальное значения угла поворота основания робота-манипулятора.

Результаты и их обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований математической модели нечеткого цифрового фильтра была разработана экспериментальная модель робота-манипулятора, представленная на рис. 6.

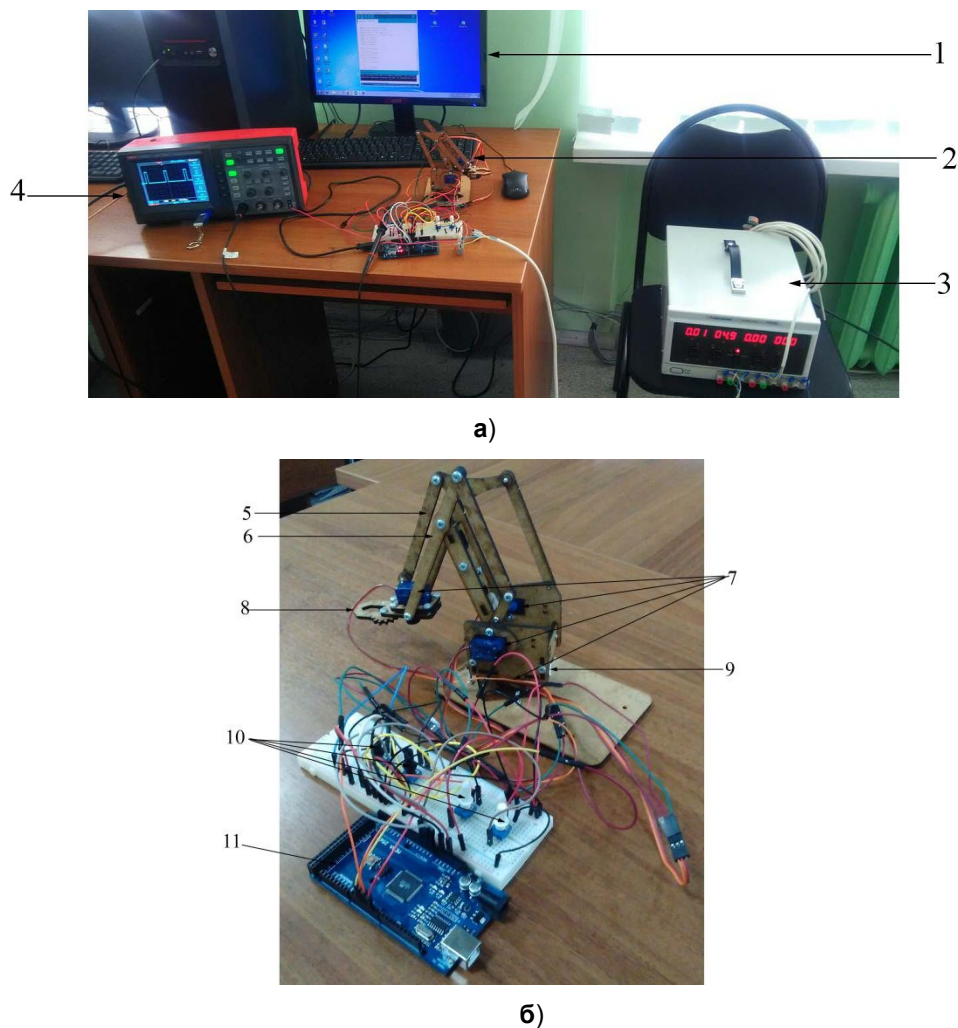


Рис. 6. Экспериментальная модель робота-манипулятора: 1 – компьютер; 2 – робот-манипулятор; 3 – блок питания; 4 – осциллограф; 5 – правое плечо; 6 – левое плечо; 7 – четыре сервопривода SG-90; 8 – захват; 9 – платформа основания; 10 – четыре потенциометра 10 кОм; 11 – управляющая плата ArduinoMega 2560

Fig. 6. Experimental model of a robotic arm: 1 – computer; 2 – robotic arm; 3 – power supply; 4 – oscilloscope; 5 – right shoulder; 6 – left shoulder; 7 – four servo drives SG-90; 8 – capture; 9 – base platform; 10 – four potentiometers 10 kOhm; 11 – Arduino Mega 2560 control board

Предложенная обобщенная математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра была реализована в системе Simulink. Результат моделирования показал, что предлагаемая модель, позволяет обеспечить требуемый угол поворота звеньев робота-манипулятора (платформа основания должна поворачиваться вокруг своей оси от 0° до 180° , левое и правое плечи должны поворачиваться от 0° до 140° , захват робота-манипулятора раскрывается от 105° до 140°) (рис. 7).

Так же в качестве эксперимента проведено сравнение результатов моделирования нечеткого цифрового фильтра с фильтром Калмана. Сравнение проводилось на основе корня из сред-

неквадратической ошибки RMSE. Полученные данные сведены в табл. 2.

Результаты моделирования приведены на рисунках 8-9, где синий цвет – фильтр Калмана, оранжевый – нечеткий цифровой фильтр.

Еще одним экспериментом было расчет коэффициента RMSE для фильтра Калмана и нечеткого цифрового фильтра при различных значениях Q – ковариация шума процесса и R – ковариация шума измерения. Результаты, полученные для фильтра Калмана сведены в табл. 3. При этом значение RMSE для нечеткого цифрового фильтра составляет 0,0201, что в 1,2 раза меньше представленных в таблице значений.

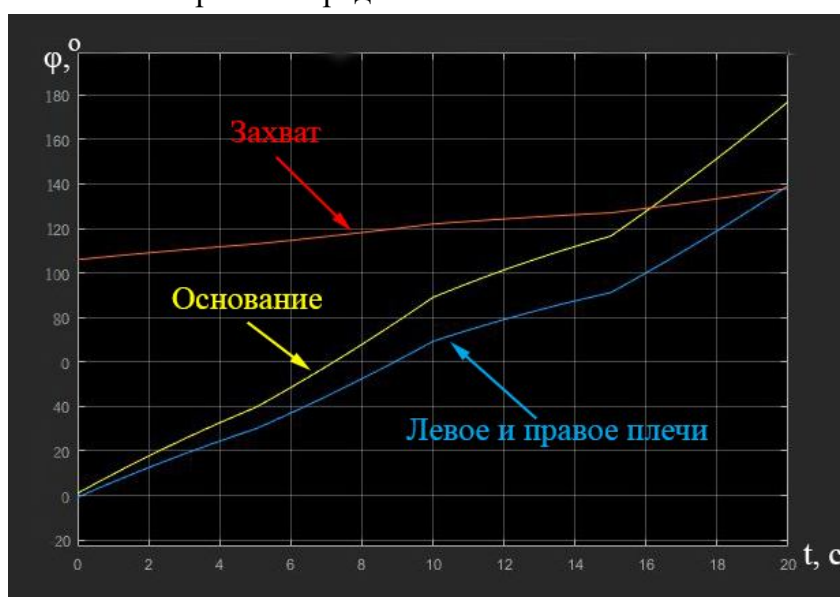


Рис. 7. Результат моделирования устройства нечеткого цифрового фильтра в среде Simulink

Fig. 7. The result of modeling a fuzzy digital filter device in a Simulink environment

Таблица 2. Значения RMSE для нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана

Table 2. RMSE values for fuzzy digital filter and Kalman filter

	Входной сигнал	Фильтр Калмана	Нечеткий фильтр
Синусоида (2 рад/с)	0,0317	0,0193	0,0185
Синусоида (4 рад/с)	0,0317	0,0207	0,0202

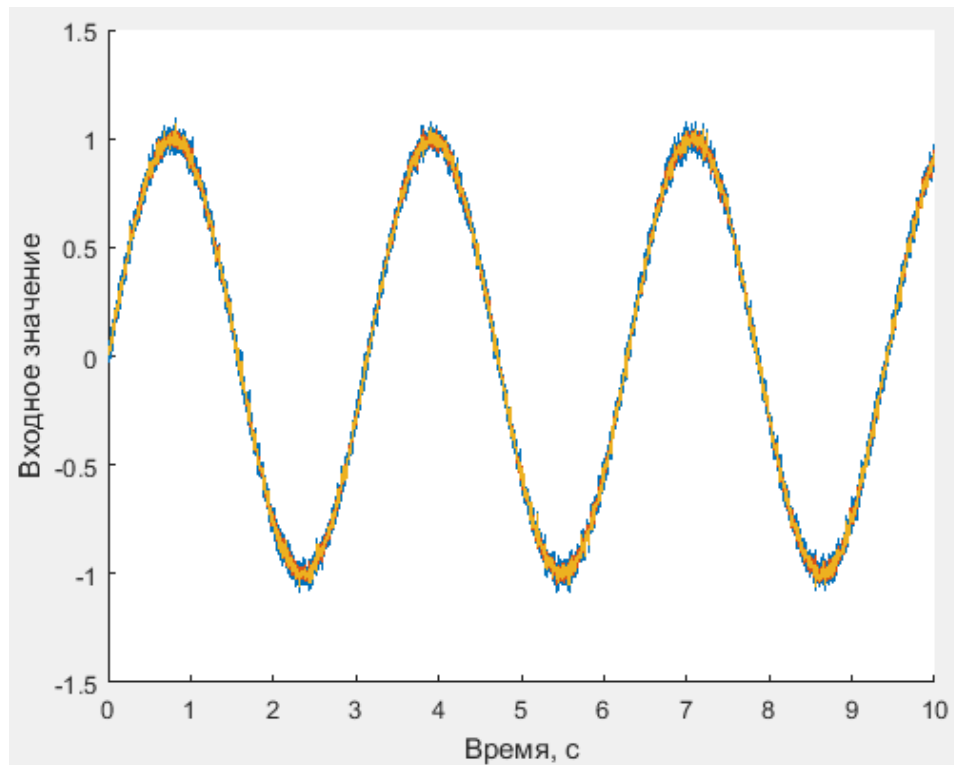


Рис. 8. Результат моделирования с входным сигналом в виде синусоиды со скоростью 2 рад/с

Fig. 8. Simulation result with an input signal in the form of a sine wave at a speed of 2 rad / s

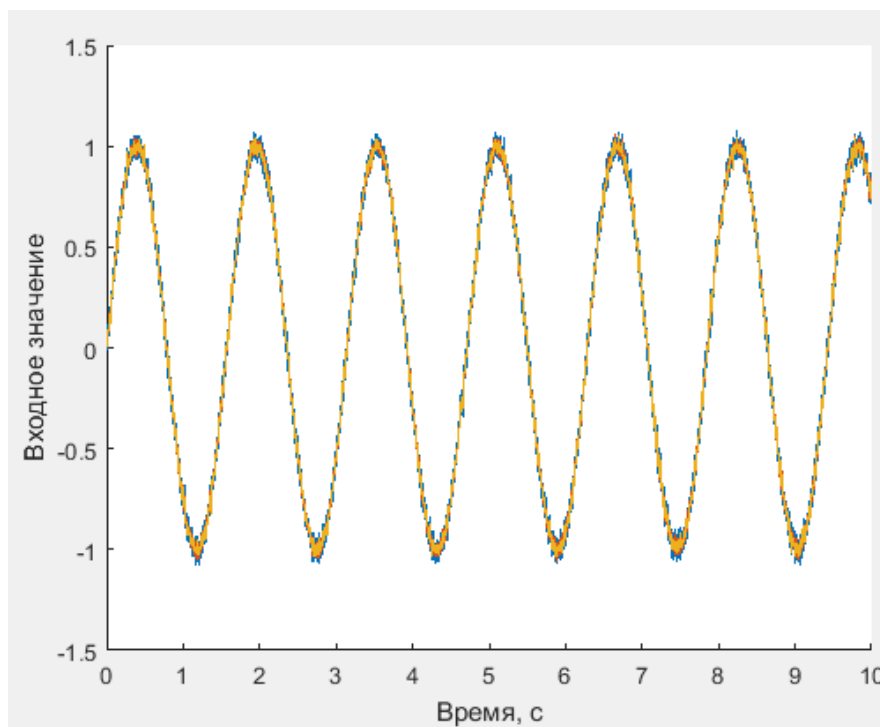


Рис.9. Результат моделирования с входным сигналом в виде синусоиды со скоростью 4 рад/с

Fig. 9. Simulation result with an input signal in the form of a sine wave at a speed of 4 rad / s

Таблица 3. Значения RMSE для фильтра Калмана при различных значениях Q и R**Table 3.** RMSE values for the Kalman filter for different values of Q and R

Q	R										
	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
50	0,0219	0,0216	0,0214	0,0212	0,0211	0,0315	0,0208	0,0207	0,0207	0,0206	0,0205
60	0,0222	0,0219	0,0217	0,0215	0,0213	0,0212	0,021	0,0209	0,0208	0,0208	0,0207
70	0,0225	0,0222	0,0219	0,0217	0,0215	0,0214	0,0212	0,0211	0,021	0,0209	0,0209
80	0,0228	0,0224	0,0222	0,0219	0,0217	0,0216	0,0214	0,0213	0,0212	0,0211	0,021
90	0,023	0,0227	0,0224	0,0221	0,0219	0,0218	0,0216	0,0215	0,0214	0,0213	0,0212
100	0,0232	0,0229	0,0226	0,0223	0,0221	0,0219	0,0218	0,0216	0,0215	0,0214	0,0213
110	0,0235	0,0231	0,0227	0,0225	0,0223	0,0221	0,0219	0,0218	0,0217	0,0216	0,0214
120	0,0237	0,0232	0,0229	0,0227	0,0224	0,0222	0,0221	0,0219	0,0218	0,0217	0,0216
130	0,0238	0,0234	0,0231	0,0228	0,0226	0,0224	0,0222	0,0221	0,0219	0,0218	0,0217
140	0,024	0,0236	0,0232	0,023	0,0227	0,0225	0,0224	0,0222	0,0221	0,0219	0,0218
150	0,0242	0,0238	0,0234	0,0231	0,0229	0,0227	0,0225	0,0223	0,0222	0,022	0,0219

Полученные результаты доказывают эффективность использования устройства нечеткого цифрового фильтра.

Выводы

В данной статье рассмотрена обобщенная математическая модель устрой-

ства нечеткого цифрового фильтра, осуществляющая перерасчет выходного напряжения, передаваемого на серво-приводы робота-манипулятора, экспериментальная модель робота-манипулятора, сравнительный анализ нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана.

Список литературы

1. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Павлюк Е.Ю. Определение точности позиционирования роботов-манипуляторов DELTA и OMEGA // Труды БрГУ. 2016. №2. С. 121-126.
2. Мархадаев Б.Е., Никифоров С.О., Улаханов Н.С. Методология оценки анализа характеристик точности мехатронных манипуляторов по кинематическим моделям // Вестник БГУ. 2016. №4. С. 50-60.
3. Малинин Д.Д., Шарапов А.Е. Повышение точности позиционирования мобильной платформы путем коррекции GPS-сигнала фильтром Калмана // Надежность и качество сложных систем. 2014. №3. С. 44-49.
4. Галкин Д.И. Алгоритм оценки параметров ориентации космического аппарата с использованием фильтра Калмана // Вестник МГТУ им. Баумана. 2013. С.1-11.
5. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(2): 53-64.

6. Бобырь М.В., Лунева М.Ю., Ноливос К.С.А. Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором ARMino // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 40. №4. С. 244 – 250.
7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the cnc machine implemented on fpga // Measurement. 2020. Vol. 152.
8. Bobyr, M.V., Milostnaya, N.A., Kulabuhov, S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // Applied Soft Computing Journal. 2017. №10. P. 19-32.
9. Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15-26.
10. Бобырь М.В. Метод нелинейного обучения нейро-нечеткой системы вывода // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. №1. С.66-74.
11. Shah R., Pandey A.B. Concept sorting robotic arm // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 20. P.400-405.
12. Long J., Shuai L., Jiguo Y. Robot manipulator control using neural networks: Asurvey // Neurocomputing. 2018. Vol. 000. P. 1-12.
13. Varshney A., Agarwal B., Behera L. Manipulator control using human arm imitation // IFAC Proceedings Volumes. 2014. Vol. 47. P. 109-114.
14. Бобырь М.В., Титов В.С., Милостная Н.А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний // Мехатроника, автоматизация и управления. 2014. №10. С. 8 – 14.
15. Ho Pham Huy Anh, Kyoung Kwan Ahn Hybrid control of a pneumatic artificial muscle (PAM) robot arm using an inverse NARX fuzzy model // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2011. №24. P. 697-716.
16. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Милостная Н.А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29. №2. С. 71-84.
17. Бобырь М.В., Титов Д.В., Кулабухов С.А. О некоторых свойствах мягкого алгоритма нечетко-логического вывода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 2 (59). С. 39-51.
18. Белов А.В. Формирование классификатора с нечеткими границами на основании кривых, заполняющих дискретное признаковое пространство // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 71-73.
19. Халин Ю.А., Сизов А.С., Игнатенко А.Н. Нечётко-множественная модель многокритериальной оценки конкурентоспособности предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 53-57.
20. Абрамова Т.В. Проектирование нейро-нечеткого дерева решений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 8-14.

References

1. Koltygin D.S., Sedelnikov I.A., Pavlyuk E.U. Opredelenie tochnosti pozitsionirovaniya robotov-manipulyatorov DELTA i OMEGA [Determination of positioning accuracy of DELTA and OMEGA robotic manipulators]. *Trudy BrGU = Transactions of BrSU*, 2016, no. 2, pp. 121-126 (In Russ.).
2. Markhadaev B.E., Nikiforov S.O., Ulakhanov N.S. Metodologiya otsenki analiza kharakteristik tochnosti mekhatronnykh manipulyatorov po kinematicheskim modelyam [Methodology for assessing the analysis of accuracy characteristics of mechatronic manipulators according to kinematic models]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*, 2016, no. 4, pp. 50-60 (In Russ.).
3. Malinin D. D., Sharapov A.E. Povyshenie tochnosti pozitsionirovaniya mobil'noi platformy putem korrektsii GPSSignala fil'trom Kalmana [Improving the accuracy of positioning a mobile platform by correcting a GPS signal with a Kalman filter]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*, 2014, no. 3, pp. 44-49 (In Russ.).
4. Galkin D.I. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem [An algorithm for estimating the orientation parameters of a spacecraft using the Kalman filter]. *Vestnik MGTU im. Bauman = Vestnik MGTU im. Bauman*, 2013, pp. 1-11 (In Russ.).
5. Bezmen P.A. Kompleksirovanie dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom s ispol'zovaniem rasshirennogo fil'tra Kalmana [Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(2): 53-64 (In Russ.).
6. Bobyr M.V., Luneva M.Yu., Nolivos K.S.A. Nechetkii tsifrovoy fil'tr dlya upravleniya robotom-manipulyatorom ARMino [Fuzzy digital filter for controlling the ARMino robotic arm]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2019, no. 4, pp. 244 - 250 (In Russ.).
7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the cnc machine implemented on fpga. *Measurement*, 2020, no. 152.
8. Bobyr, M.V., Milostnaya, N.A., Kulabuhov, S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio. *Applied Soft Computing Journal*, 2017, no.10, pp. 19-32.
9. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neuro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadei [Training a neuro-fuzzy system based on the area difference method]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial Intelligence and Decision Making*, 2016, no. 4, pp. 15-26 (In Russ.).
10. Bobyr M.V. Metod nelineinogo obucheniya neuro-nechetkoi sistemy vyvoda [The method of nonlinear training of a neuro-fuzzy inference system]. *Iskusstvennyi intellekt i*

prinyatie reshenii = Artificial Intelligence and Decision Making, 2018, no. 1, pp.66-74 (In Russ.).

11. Shah R., Pandey A.B. Concept sorting robotic arm. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp.400-405.

12. Long J., Shuai L., Jiguo Y. Robot manipulator control using neural networks: Asurvey. *Neurocomputing*, 2018, vol. 000, pp. 1-12.

13. Varshney A., Agarwal B., Behera L. Manipulator control using human arm imitation. *IFAC Proceedings Volumer*, 2014, vol. 47, pp. 109-114.

14. Bobyr M.V., Titov V.S., Milostnaya N.A. Prognozirovanie raboty mekhatronnykh sistem na osnove myagkikh nechetskikh baz znaniy [Prediction of the operation of mechatronic systems based on soft fuzzy knowledge bases]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniya = Mechatronics, Automation and Control*, 2014, no. 10, pp. 8-14 (In Russ.).

15. Ho Pham Huy Anh, Kyoung Kwan Ahn Hybrid control of a pneumatic artificial muscle (PAM) robot arm using an inverse NARX fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, no.24, pp. 697-716.

16. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Milostnaya N.A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [The method of calculating the depth map based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and means of computer science*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 71-84 (In Russ.).

17. Bobyr' M.V., Titov D.V., Kulabuhov S.A. O nekotorykh svoistvakh myagkogo algoritma nechetko-logicheskogo vyvoda [On Some Properties of Soft of Fuzzy Logical Deduction]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 2 (59), pp. 39-51 (In Russ.).

18. Belov A.V. Formirovanie klassifikatora s nechetskimi granicami na osnovanii krivyyh, zapolnjajushhih diskretnoe priznakovoe prostranstvo [Qualifier Formation with Fuzzy Borders on the Basis of the Curves Filling Discrete Attribute Space]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 71-73 (In Russ.).

19. Halin Ju.A., Sizov A.S., Ignatenko A.N. Nechjotko-mnozhestvennaja model' mnogokriterial'noj ocenki konkurentosposobnosti predpriyatija [Fuzzy-Sets Model Multicriteria of Estimation of Competitiveness of Enterprise]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 53-57 (In Russ.).

20. Abramova T.V. Proektirovanie nejro-nechetkogo dereva reshenij [Design of Neuro-Fuzzy Decision Tree]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 1 (64), pp. 8-14 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Милостная Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Natalia A. Milostnaya, Cand. of Sci. (Engineering), Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat_mil@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Булатников Валентин Альбертович, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rb465687@gmail.com

Valentine A. Bulatnikov, Post-Graduate Student, Department of Computer Engineering, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rb465687@gmail.com

Лунева Марина Юрьевна, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: marinok-l@yandex.ru

Marina Yu. Luneva, Post-Graduate Student, Department of Computer Engineering, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: marinok-l@yandex.ru

Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов морских судов

Д. И. Конарев¹, А. А. Гуламов¹✉

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

✉ e-mail: profgulamov@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В области инфокоммуникационного обеспечения судоходства Канала имени Москвы актуальной задачей является мониторинг судов с использованием камер видеонаблюдения, установленных на протяжении канала. Основной подзадачей является непосредственно распознавание судов на изображении или видео, для чего перспективно применение нейронной сети.

Методы. В работе рассмотрены различные архитектуры нейронной сети. Входными данными для сети являются изображения судов. Обучающая выборка использует набор данных CIFAR-10. Сеть построена и обучена с использованием библиотек машинного обучения Keras и TensorFlow.

Результаты. Описано применение свёрточных искусственных нейронных сетей для задач распознавания образов и преимущества такой архитектуры при работе с изображениями. Обоснован выбор языка Python для реализации нейронной сети и описаны основные применяемые библиотеки машинного обучения, такие, как TensorFlow и Keras. Проведён эксперимент по обучению свёрточных нейронных сетей с различной архитектурой на базе сервиса Google collaboratoty. Проведена оценка эффективности различных архитектур в процентном соотношении случаев правильного распознавания образов на тестовой выборке. Сделаны выводы о влиянии параметров свёрточной нейронной сети на проявление её эффективности.

Заключение. Сеть с одним свёрточным слоем в каждом каскаде показала недостаточные результаты, поэтому были рассмотрены трёхкаскадные свёрточные сети с двумя и тремя свёрточными слоями в каждом каскаде. Наибольшее влияние на точность распознавания образов оказало увеличение карты признаков. Наращивание числа каскадов оказало менее заметный эффект, а увеличение числа свёрточных слоёв в каждом каскаде не всегда приводит к повышению точности работы нейронной сети. В процессе исследования трёхкаскадная сеть с двумя свёрточными слоями в каждом каскаде и 128 картами признаков определена как оптимальная архитектура нейронной сети в рассматриваемых условиях. Проверка работоспособности части рассматриваемых архитектур на случайных изображениях судов подтвердила правильность выбора оптимальной архитектуры.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети; свёрточная нейронная сеть; ядро свёртки; Keras; TensorFlow; Google collaboratoty; Cifar-10.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Конарев Д. И., Гуламов А. А. Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов морских судов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 130-143. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-130-143>.

Поступила в редакцию 14.10.2019

Подписана в печать 22.12.2019

Опубликована 21.02.2020

© Конарев Д. И., Гуламов А. А., 2020

Synthesis of Neural Network Architecture for Recognition of Sea-Going Ship Images

Dmitrii I. Konarev¹, Alisher A. Gulamov¹ ✉

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

✉ e-mail: profgulamov@mail.ru

Резюме

Purpose of research. The current task is to monitor ships using video surveillance cameras installed along the canal. It is important for information communication support for navigation of the Moscow Canal. The main subtask is direct recognition of ships in an image or video. Implementation of a neural network is perspective.

Methods. Various neural network are described. Images of ships are an input data for the network. The learning sample uses CIFAR-10 dataset. The network is built and trained by using Keras and TensorFlow machine learning libraries.

Results. Implementation of curving artificial neural networks for problems of image recognition is described. Advantages of such architecture when working with images are also described. The selection of Python language for neural network implementation is justified. The main used libraries of machine learning, such as TensorFlow and Keras are described. An experiment has been conducted to train swirl neural networks with different architectures based on Google collaboratory service. The effectiveness of different architectures was evaluated as a percentage of correct pattern recognition in the test sample. Conclusions have been drawn about parameters influence of screwing neural network on showing its effectiveness.

Conclusion. The network with a single curl layer in each cascade showed insufficient results, so three-stage curls with two and three curl layers in each cascade were used. Feature map extension has the greatest impact on the accuracy of image recognition. The increase in cascades' number has less noticeable effect and the increase in the number of screwdriver layers in each cascade does not always have an increase in the accuracy of the neural network. During the study, a three-frame network with two buckling layers in each cascade and 128 feature maps is defined as an optimal architecture of neural network under described conditions. operability checking of architecture's part under consideration on random images of ships confirmed the correctness of optimal architecture choosing.

Keywords: artificial neural networks; convolutional neural network; convolution kernel; Keras; TensorFlow; Google collaboratory; Cifar-10.

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

For citation: Konarev D. I., Gulamov A. A. Synthesis of Neural Network Architecture for Recognition of Sea-Going Ship Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 130-143 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-130-143>.

Received 14.10.2020

Accepted 22.12.2020

Published 21.02.2020

Введение

Исходя из цели разработки методов и системы программно-технических средств сбора, обработки, хранения, анализа параметров судоходных каналов, обеспечения навигации грузо- и пассажироперевозок в рамках информационно-телекоммуникационной системы мониторинга и управления судоходством Канала имени Москвы основной задачей является разработка комплекса клиентских программных средств сбора и анализа параметров судоходства [1, 2, 3]. Наряду с подсистемой хранения данных на базе технологии блокчейн необходимо организовать мониторинг судов.

В области инфокоммуникационного обеспечения мониторинга судоходства Канала имени Москвы основной подзадачей является непосредственно распознавание судов на изображении или видео, для чего перспективно применение нейронной сети. Применение видеосистемы обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам представлено в работе [4]. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений исследуется в [5]. Выделение контуров изображений морских судов на основе построения видеосистемы искусственного зрения, автоматического обнаружения и распознавания водных (морских) транс-портных средств рассмотрено в [6]. Классифика-

ция морских судов с применением свёрточных нейронных сетей приведена в [7].

Свёрточная нейронная сеть – один из лучших алгоритмов по распознаванию и классификации изображений. По сравнению с полносвязной нейронной сетью (типа перцептрона) — гораздо меньшее количество настраиваемых весов, так как одно ядро весов используется целиком для всего изображения, вместо того, чтобы делать для каждого пикселя входного изображения свои персональные весовые коэффициенты [8, с. 115]. Это подталкивает нейросеть при обучении к обобщению демонстрируемой информации, а не попиксельному запоминанию каждой показанной картинке в мириадах весовых коэффициентов, как это делает перцептрон [9, с. 52].

При применении нейронных сетей для решения задач распознавания образов морских судов актуально использование языка Python [10, с. 15], библиотек TensorFlow и Keras. TensorFlow – это библиотека для работы с многомерными матрицами, тензорами, которые широко применяются при обучении нейронных сетей, и вычислений на графах потоков данных [11, с. 271]. Keras – это библиотека глубокого обучения, которую используют TensorFlow или Theano для выполнения эффективных вычислений [12, с. 177]. Особенность библиотеки Keras в том, что она позволяет на Python описывать нейронную сеть.

Материалы и методы

Полносвязные сети – самый простой тип нейронных сетей. Однако необходимо обучить большое количество весов даже для маленьких изображений и данные представляются в виде одномерного вектора или массива, таким образом теряется топологическая информация, важная для обработки изображений [13, с. 23]. Учитывается связь пикселей по горизонтали, но не по вертикали. Свёрточные нейронные сети лишены таких недостатков и преимущественно используются на практике для обработки изображений и видео. Свёрточные сети используют следующие принципы:

- локальное восприятие;
- разделяемые веса;
- уменьшение размерности.

В связи с этим, в процессе решения задачи для распознавания образов применялась свёрточная нейронная сеть с использованием алгоритма обучения с учителем [14, с. 396]. Операция свертки заключается в том, что рассматривается некоторая область изображения, например 3 на 3, значение интенсивности каждого пикселя в этом участке умножается на соответствующий элемент ядра свертки. Ядро свертки – матрица такого же размера, как рассматриваемый участок изображения. После этого все полученные элементы складываются [15, с. 592].

Рабочая сеть реализована на платформе Google collaboratory, а примерная структура простейшего её варианта представлена на рис. 1.

```
[ ] # Создание последовательной модели
model = Sequential()

# Сверточный слой
model.add(Conv2D(8, (3, 3), padding='same', input_shape=(32, 32, 3), activation='relu'))
# Слой подвыборки
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))
# Слой регуляризации Dropout
model.add(Dropout(0.25))

# Слой преобразования данных из 2D представления в плоское
model.add(Flatten())
# Полносвязный слой для классификации
model.add(Dense(512, activation='relu'))
# Слой регуляризации Dropout
model.add(Dropout(0.5))
# Выходной полносвязный слой
model.add(Dense(nb_classes, activation='softmax'))
```

Рис. 1. Описание модели нейронной сети

Fig. 1. Description of the neural network model

Библиотека Keras уже содержит функции для загрузки набора данных CIFAR-10, 90% выборки используется как обучающая, а 10% – как проверочная [16, с. 161].

Входными данными нейронной сети является набор изображений в формате RGB. Разрешение изображений в наборе данных составляет 32 на 32 пикселя, что позволит нейронной сети рас-

познавать суда на изображениях небольшого разрешения, характерных для камер видеонаблюдения [17, с. 92]. На рис. 2 представлен пример входного изображения.

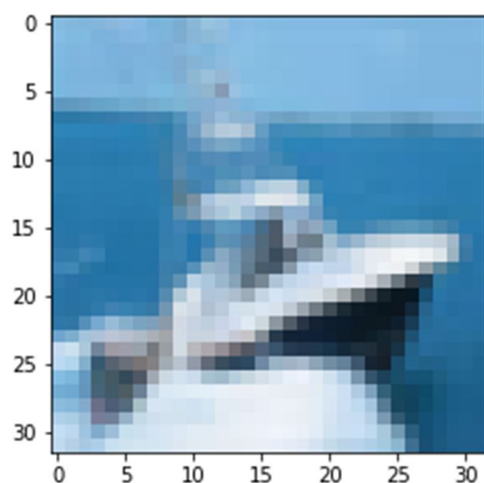


Рис. 2. Описание модели нейронной сети

Fig. 2. Description of the neural network model

Выходными данными нейронной сети является номер класса, к которому относится изображение. Если распознанный сетью класс изображения соответствует действительности, считаем ответ верным и указываем в таблице процент верных ответов при распознавании тестовой подвыборки. Этот параметр называется точностью – отношение верно угаданных объектов клас-

са ко всем объектам, которые мы определили как объекты класса.

Изменением параметров сети, таких, как число каскадов, число свёрточных слоёв в сети и количество карт признаков, проводилась оптимизация архитектуры сети. На рис. 3 представлена схема двухкаскадной сети с двумя слоями свёртки в каждом каскаде и 32 картами признаков. Для других сетей из эксперимента внешний вид схемы будет отличаться в зависимости от указанных выше параметров, но общая структура сети будет сохраняться. Так как параметры метода обучения установлены таким образом, что библиотека в начале каждой эпохи будет перемешивать данные для повышения качества обучения, то при каждой итерации обучения с одинаковыми параметрами результат работы сети будет незначительно отличаться, и для более точной оценки необходимо провести несколько итераций обучения [18, с. 370]. Вместе с тем каждая итерация обучения – длительный процесс, и чем глубже сеть, тем больше времени она занимает, поэтому необходимо выбрать минимальное достаточное число итераций [19, с. 80].

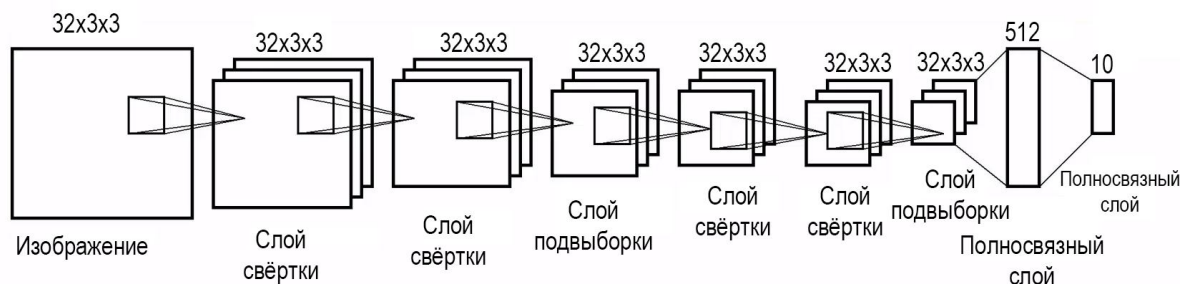


Рис. 3. Схема двухкаскадной сети с двумя слоями свёртки в каждом каскаде и 32 картами признаков

Fig. 3. Diagram of a two-stage network with two convolution layers in each stage and 32 feature cards

Результаты и их обсуждение

На основании полученных данных, предложено проводить 3 итерации обучения и оценивать сеть по среднему

значению. В табл. 1 представлены результаты работы нейронной сети из 2 каскадов с переменным размером карты признаков. В каждом каскаде имеется один свёрточный слой.

Таблица 1. Результаты работы разрешения изображений двухкаскадной нейронной сети с одним свёрточным слоем в каждом каскаде

Table 1. Image resolution results of a two-stage neural network with one convolutional layer in each stage

Число карт признаков	Первая итерация (%)	Вторая итерация (%)	Третья итерация (%)	Среднее значение (%)
8	63,2	65,53	63,67	64,13
16	71,16	70,56	71,96	71,23
24	71,47	69,83	70,33	70,54
32	73,79	73,99	74,64	74,14
40	75,24	75,43	73,98	74,88
48	75,52	75,47	75,27	75,42
64	76,08	75,15	75,61	75,61
128	74,57	75,41	75,22	75,07

Видим, что точность работы сети значительно увеличивается при увеличении числа карт до 32 признаков, дальнейшее наращивание числа карт признаков не даёт значительного прироста эффективности, а карта размером 128 признаков даже даёт снижение эф-

фективности работы, что может свидетельствовать о переобучении сети [20, с. 51].

Результаты для двухкаскадной сети с 2 свёрточными слоями приведены в табл. 2, с 3 свёрточными слоями – в табл. 3

Таблица 2. Результаты работы двухкаскадной нейронной сети с двумя свёрточными слоями в каждом каскаде

Table 2. The results of the work of a two-stage neural network with two convolutional layers in each cascade

Число карт признаков	Первая итерация (%)	Вторая итерация (%)	Третья итерация (%)	Среднее значение (%)
8	66,54	67,46	67,27	67,09
16	75,02	74,26	74,67	74,65
24	76,46	76,41	75,75	76,21
32	78,64	77,64	78,47	78,25
40	78,91	79,04	78,25	78,73
48	79,30	80,06	79,31	79,56
64	79,70	78,87	79,34	79,30
128	79,94	79,94	79,62	79,83

Таблица 3. Результаты работы двухкаскадной нейронной сети с тремя свёрточными слоями в каждом каскаде**Table 3.** The results of a two-stage neural network with three convolutional layers in each cascade

Число карт признаков	Первая итерация (%)	Вторая итерация (%)	Третья итерация (%)	Среднее значение (%)
8	65,38	65,77	66,74	65,96
16	73,05	74,14	74,82	74,00
24	76,68	75,56	76,56	76,27
32	78,19	78,67	79,49	78,78
40	79,21	78,71	79,52	79,15
48	79,64	79,82	80,72	80,06
64	81,19	80,83	80,44	80,82
128	81,67	81,49	81,60	81,59

В сравнении с предыдущей сетью средний прирост точности составляет всего 0,38%. Результаты добавления

ещё одного каскада, для двух свёрточных слоёв в каждом каскаде и приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты работы трёхкаскадной нейронной сети с двумя свёрточными слоями в каждом каскаде**Table 4.** The results of a three-stage neural network with two convolutional layers in each cascade

Число карт признаков	Первая итерация (%)	Вторая итерация (%)	Третья итерация (%)	Среднее значение (%)
8	52,44	53,97	52,60	53,00
16	68,16	67,00	67,07	67,41
24	71,17	72,40	73,62	72,40
32	75,40	76,80	75,05	75,75
40	77,71	77,57	78,79	78,02
48	78,66	78,97	78,93	78,85
64	81,41	81,51	80,37	81,10
128	82,07	81,73	82,57	82,12

В сравнении с предыдущей сетью видим, что эффективность сети ухудшилась (в среднем на 1,83%).

Таким образом, эффективной архитектурой нейронной сети для рассматриваемого случая является трёхкаскадная сеть с двумя свёрточными слоями в каждом каскаде и 128 картами признаков. В сравнении с двухкаскадной сетью

средняя эффективность снизилась более чем на 3%, но это обусловлено очень низкой эффективностью при малом числе признаков. Вместе с тем точность сети при 128 признаках составила 82,12%, что является лучшим результатом. Далее, в табл. 5 приведены результаты работы трёхкаскадной сети с тремя свёрточными слоями.

Таблица 5. Результаты работы трёхкаскадной нейронной сети с тремя свёрточными слоями в каждом каскаде**Table 5.** The results of a three-stage neural network with three convolutional layers in each cascade

Число карт признаков	Первая итерация (%)	Вторая итерация (%)	Третья итерация (%)	Среднее значение (%)
8	50,79	44,70	46,10	47,20
16	64,59	64,55	64,43	64,52
24	71,66	71,11	72,19	71,65
32	75,79	74,32	75,30	75,14
40	76,82	77,73	75,81	76,79
48	79,30	80,33	78,25	79,29
64	77,98	80,37	79,70	79,35
128	81,49	78,62	80,13	80,08

Выводы

Наибольшее влияние на точность распознавания образов оказало увеличение числа карт признаков. Наращивание числа каскадов оказало менее заметный эффект, а увеличение числа свёрточных слоёв в каждом каскаде не всегда приводит к повышению точности работы нейронной сети.

На рис. 4 показана зависимость точности описанной выше нейронной сети на обучающей выборке (обозначена точками) и на проверочной выборке (обозначена линией) в зависимости от числа эпох обучения.

Сравнение результатов распознавания изображений представлено в табл. 6.

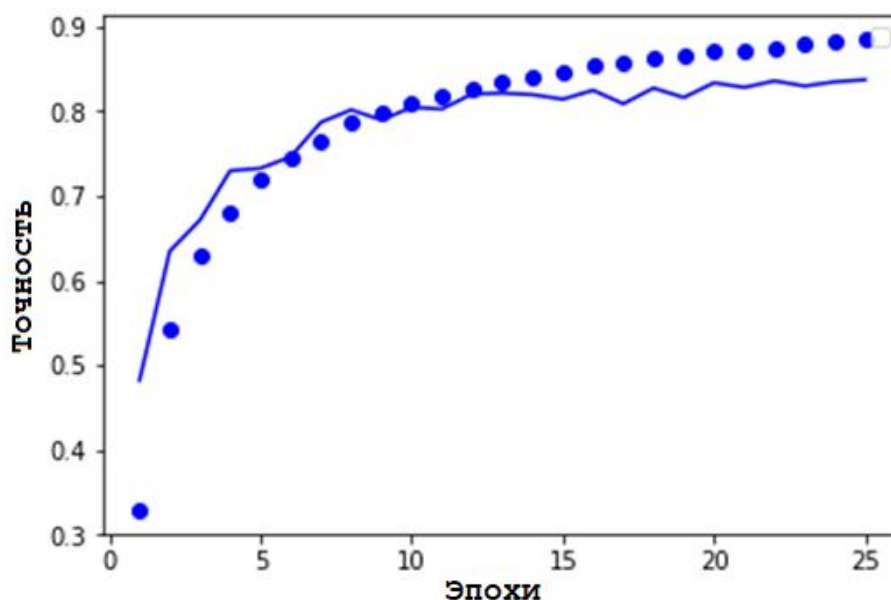
**Рис. 4.** Изменение точности трёхкаскадной нейронной сети с двумя свёрточными слоями в каждом каскаде в зависимости от числа обучающих эпох**Fig. 4.** Changing the accuracy of a three-stage neural network with two convolutional layers in each stage depending on the number of training eras

Таблица 6. Сравнение результатов распознавания изображений

Table 6. Comparison of image recognition results

Изображение	3 каскада 2 слоя 8 признаков	3 каскада 2 слоя 128 признаков	3 каскада 3 слоя 8 признаков	3 каскада 3 слоя 128 признаков	2 каскада 2 слоя 8 признаков	2 каскада 2 слоя 128 признаков	2 каскада 3 слоя 8 признаков	2 каскада 3 слоя 128 признаков
	X	✓	X	X	✓	X	X	X
	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
	✓	✓	X	✓	X	✓	X	X
	X	X	X	X	X	X	X	✓
	X	X	X	X	X	X	X	X

В соответствии с представленными данными лучший результат показывает трёхкаскадная сеть с двумя свёрточными слоями, верно распознав 4 изображения из 6 представленных. Таким образом подтверждено, что в рассматриваемом случае наиболее эффективной архитектурой нейронной сети оказалась трёхкаскадная сеть с двумя свёрточными слоями в каждом каскаде и 128 картами признаков.

Сравним точность данной модели с известными архитектурами свёрточных сетей, побеждавшими в ImageNet Large Scale Visual Classification Challenge (ILSVRC) с 2012 года. Оценка сетей производится по top-5 ошибке, это

означает, что ответ считается верным, если объект на изображении соответствует одному из 5 наиболее вероятных классов, выбранных сетью. Кроме того приводится ошибка ансамбля сетей, то есть группы отдельно обученных сетей, где ответом ансамбля считается среднее арифметическое ответов каждой отдельной сети. Так top-5 ошибки сети AlexNet для ансамбля в 2012 году с 15,40% уменьшился до 3,10% сети Inception-ResNet для ансамбля в 2016 году. Для одиночных моделей представленных нейронных сетей этот интервал составляет от 17% до 4,49%. Модель, полученную в эксперименте, будем сравнивать по top-1 ошибке, то есть за

ответ нейронной сети будем считать один класс с наибольшей вероятностью. Top-1 ошибки для полученной сети – значение, обратное точности. Таким об-

разом, $100\% - 82,12\% = 17,88\%$. В табл. 7 представлены результаты top-1 и top-5 ошибки для одной модели популярных архитектур нейронных сетей.

Таблица 7. Результаты top-1 и top-5 ошибки для одной модели популярных архитектур нейронных сетей

Table 7. Top-1 and top-5 errors results for one model of popular architectural neural networks

Нейронная сеть	Top-1	Top-5
AlexNet	39,00	17,00
ZF Net	37,50	16,00
VGG Net	25,60	8,10
GoogLeNet	29,00	9,20
Inception-v3	21,20	5,60
Inception-v4	20,00	5,00
Inception-ResNet-v2	19,90	4,90
ResNet-151	19,38	4,49

Видим, что полученная архитектура сети имеет лучший показатель top-1 ошибки среди представленных. Даль-

нейшее проведение эксперимента заключается в синтезе оптимальной архитектуры ансамбля таких сетей.

Список литературы

1. Гольцова И. А., Гуламов А. А. Информационное обеспечение участка железной дороги // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6–11. https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/archiv/2_2017.pdf
2. Маклаков Е. С., Гуламов А.А. Узел сбора информации диспетчерского центра // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 6(81). С. 136-142. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-6-136-142>.
3. Маклаков Е. С., Гуламов А.А. Оптимизация «последних миль» до удаленных узлов доступа путем применения технологии LCAS // Моделирование, оптимизация и информационные технологии: научный журнал. 2019. Т. 7. № 3. <http://moit.vivt.ru/>. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.039>.
4. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным рашёткам / Ш. С. Фахми, Е. В. Костикова, М. С. Крюкова, С. А. Селиверстов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-3 (41). С.143-155. http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1536237135MITVOL41No3PART12018compressed.pdf
5. Фахми Ш. С., Шаталова Н. В., Крюкова М. С. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений //

Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С.129-136. http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1560970718MITVOL44No2PART12019.pdf

6. Выделение контуров изображений морских судов / Ш. С. Фахми, Н. В. Шаталова, С. А. Селиверстов, Е. С. Калинина, А. В. Иванов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С.132-142. http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1568625233MITVOL45No3PART32019_compressed1.pdf

7. Erhu Zhang, Kelu Wang, Guangfeng Lin Classification of marine vessels with multi-feature structure fusion // *Applied Science*. 2019. № 9(10). P. 2153. <https://doi.org/10.3390/app9102153>.

8. Tom Hope, Yehezkel S. Resheff, Itay Lieder Learning TensorFlow: A Guide to Building Deep Learning Systems *O'Reilly Media*; 1 edition, 2017. 242 p. <https://www.oreilly.com/catalog/errata.csp?isbn=0636920044116>

9. Андреас Мюллер. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными. М.: Вильямс, 2017. 480 с. https://codernet.ru/books/python/vvedenie_v_mashinnoe_obuchenie_s_pomoshhyu_python/

10. Себастьян Рашка. Python и машинное обучение. М.: ДМК-Пресс, 2017. 418 с.

11. Martín Abadi, Paul Barham, Jianmin Chen, Zhifeng Chen, Andy Davis, Jeffrey Dean, Matthieu Devin, Sanjay Ghemawat, Geoffrey Irving, Michael Isard, Manjunath Kudlur, Josh Levenberg, Rajat Monga, Sherry Moore, Derek G. Murray, Benoit Steiner, Paul Tucker, Vijay Vasudevan, Pete Warden, Martin Wicke, Yuan Yu, and Xiaoqiang Zheng, Google Brain Tensor flow: A system for large-scale machine learning // Operating Systems Design and Implementation: Proc. 12th Symposium, Savannah, GA, USA, 2016. pp. 265-283. <https://www.usenix.org/system/files/conference/osdi16/osdi16-abadi.pdf>

12. Антонио Джулли, Суджит Пал. Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. Реализация нейронных сетей с помощью библиотек Theano и Tensor Flow. М.: ДМК-Пресс, 2017. 296 с.

13. Франсуа Шолле. Глубокое обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с.

14. Aurélien Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems *O'Reilly Media*, 2017. 574 p. https://www.academia.edu/37010160/Hands-On_Machine_Learning_with_Scikit-Learn_and_TensorFlow.

15. Ian Goodfellow, Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series) *The MIT Press*, 2016. 800 p. https://www.academia.edu/38223830/Adaptive_Computation_and_Machine_Learning_series-Deep_learning-The_MIT_Press_2016_.pdf

16. Tariq Rashid, Make Your Own Neural Network *CreateSpace Independent Publishing Platform*, 2016. 222 p.

17. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview // *Neural Networks*. 2015. Vol. (61). P. 85–117. <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/DeepLearningInNeuralNetworksOverview.JSchmidhuber2015.pdf>

18. Josh Patterson, Adam Gibson Deep Learning: A Practitioner's Approach *O'Reilly Media, Inc.* 2017. 532 p. https://www.academia.edu/37119738/Deep_Learning_A_Practitioners_Approach
19. Саймон Хайкин. Нейронные сети. М.: Вильямс, 2018. 1104 с.
20. Michael Taylor The Math of Neural Networks *Amazon Digital Services LLC - Kdp Print Us*, 2017. 168 p. https://cours.etsmtl.ca/sys843/REFS/Books/ebook_Haykin09.pdf

References

1. Gol'tsova I. A., Gulamov A. A. Informationsionnoe obespechenie uchastka zheleznoi dorogi [Information support of the railway section]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2017, vol. 7, no. 2(23), pp. 6–11 (In Russ.).
2. Maklakov Ye. S., Gulamov A.A. Uzel sbora informatsii dispetcherskogo tsentra [The Collection of Information Control Center]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 6(81), pp. 136-142 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-6-136-142> (In Russ.).
3. Maklakov Ye. S., Gulamov A.A. Optimizatsiya «poslednikh mil'» do udalennykh uzlov dostupa putem primeneniya tekhnologii LCAS [Optimization of "last miles" to remote access nodes by application of LCAS technology]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii. Nauchnyy zhurnal = Modeling, optimization and information technology. Scientific journal*, 2019, vol. 7, no. 3. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.039> (In Russ.).
4. Fakhmi Sh. S., Kostikova E. V., Kryukova M. S., Seliverstov S. A. Videosistema obnaruzheniya morskikh sudov po triangulyatsionnym rashetkam [Video system for the detection of ships by triangulation grids]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine Intelligent Technology*, 2018. no. 1-3 (41), pp.143-155. http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1536237135MITVOL41No3PART12018compressed.pdf (In Russ.).
5. Fakhmi Sh. S., Shatalova N. V., Kryukova M. S. Vyделение konturov morskikh ob"ektov na osnove piramidal'no-rekursivnogo metoda predstavleniya izobrazhenii [Isolation of the contours of marine objects based on the pyramidal-recursive image representation method]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine Intelligent Technology Publ.*, 2019, no. 2-2 (44), pp.129-136. http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1560970718MITVOL44No2PART12019.pdf (In Russ.).
6. Fakhmi Sh. S., Shatalova N. V., Seliverstov S. A., Kalinina E. S., Ivanov A. V. Vyделение konturov izobrazhenii morskikh sudov [Highlighting the contours of images of ships]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii = Marine Intelligent Technology*. 2019, no. 3-3 (45), pp.132-142.

7. Erhu Zhang, Kelu Wang, Guangfeng Lin Classification of marine vessels with multi-feature structure fusion. *Applied Science*, 2019, no. 9(10), 2153 p. <https://doi.org/10.3390/app9102153>.

8. Tom Hope, Yehezkel S. Resheff, Itay Lieder Learning TensorFlow: A Guide to Building Deep Learning Systems *O'Reilly Media*; 1 edition, 2017, 242 pp. <https://www.oreilly.com/catalog/errata.csp?isbn=0636920044116>.

9. Andreas Myuller. *Vvedenie v mashinnoe obuchenie s pomoshch'yu Python* [Introduction to machine learning with Python. Guide for data professionals]. Moscow, Vil'yams Publ., 2017, 480 p. https://codernet.ru/books/python/vvedenie_v_mashinnoe_obuchenie_s_pomoshchyu_python/ (In Russ.).

10. Sebast'yan Rashka. *Python i mashinnoe obuchenie* [Python and machine learning]. Moscow, *DMK-Press Publ.*, 2017. 418 p. (In Russ.).

11. Martín Abadi, Paul Barham, Jianmin Chen, Zhifeng Chen, Andy Davis, Jeffrey Dean, Matthieu Devin, Sanjay Ghemawat, Geoffrey Irving, Michael Isard, Manjunath Kudlur, Josh Levenberg, Rajat Monga, Sherry Moore, Derek G. Murray, Benoit Steiner, Paul Tucker, Vijay Vasudevan, Pete Warden, Martin Wicke, Yuan Yu, and Xiaoqiang Zheng, Google Brain Tensor flow: A system for large-scale machine learning. Operating Systems Design and Implementation: Proc. 12th Symposium, Savannah, GA, USA, 2016, pp. 265-283. <https://www.usenix.org/system/files/conference/osdi16/osdi16-abadi.pdf>.

12. Antonio Dzhulli, Sudzhit Pal. *Biblioteka Keras – instrument glubokogo obu-cheniya. Realizatsiya neironnykh setei s pomoshch'yu bibliotek Theano i Tensor Flow* [Keras Library is a deep learning tool. Implementing neural networks using Theano and Tensor Flow libraries.]. Moscow, *DMK-Press Publ.*, 2017, 296 p. (In Russ.).

13. Fransua Sholle. *Glubokoe obuchenie na Python* [Python Deep Learning]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2018. 400 p. (In Russ.).

14. Aurélien Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems *O'Reilly Media*, 2017. 574 p. https://www.academia.edu/37010160/Hands-On_Machine_Learning_with_Scikit-Learn_and_TensorFlow.

15. Ian Goodfellow, Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series) *The MIT Press*, 2016. 800 p. https://www.academia.edu/38223830/Adaptive_Computation_and_Machine_Learning_series-Deep_learning-The_MIT_Press_2016.pdf

16. Tariq Rashid, Make Your Own Neural Network *CreateSpace Independent Publishing Platform*, 2016, 222 p.

17. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview *Neural Networks*. 2015, vol. (61), pp. 85–117. <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/DeepLearningInNeural-NetworksOverview.JSchmidhuber2015.pdf>.

18. Josh Patterson, Adam Gibson *Deep Learning: A Practitioner's Approach* *O'Reilly Media, Inc.* 2017, 532 p. https://www.academia.edu/37119738/Deep_Learning_A_Practitioners_Approach.
19. Saimon Khaikin. *Neironnye seti* [Neural networks]. Moscow, Vil'yams Publ., 2018, 1104 p. (In Russ.).
20. Michael Taylor *The Math of Neural Networks* *Amazon Digital Services LLC - Kdp Print Us*, 2017. 168 p. https://cours.etsmtl.ca/sys843/REFS/Books/ebook_Haykin09.pdf

Информация об авторах / Information about the Authors

Конарев Дмитрий Игоревич, аспирант,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: dmitrii.konarev@gmail.com

Dmitrii I. Konarev, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: dmitrii.konarev@gmail.com

Гуламов Алишер Абдумаликович,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры КПиСС,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: profgulamov@mail.ru

Alisher A. Gulamov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: profgulamov@mail.ru

Алгоритм сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска дефектов

С. В. Еремеев¹ ✉, С. А. Романов²

¹ Муромский институт ФГБОУ ВО Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ул. Орловская 23, г. Муром 602264, Российская Федерация

² ООО «СимбирСофт»
пр. Нариманова 1, г. Ульяновск 432001, Российская Федерация

✉ e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является разработка алгоритма сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска и классификации дефектов. Алгоритм направлен на повышение качества производимой продукции на предприятиях с непрерывным производством (металлургия, деревообрабатывающая промышленность и другие).

Методы. Для сегментации изображения предлагается установить связи между пикселями изображения. В дальнейшем, в процессе итерационного разрыва связей по мере увеличения их весов пиксели будут объединяться в группы, называемые дырами. Пиксели, объединенные в единую группу, имеют как свои первоначальные характеристики, так и общие характеристики для всей группы, а также изменяют веса своих связей с представителями других групп. Таким образом, образуется история формирования отдельных групп пикселей, которые можно обозначить в виде сегментов с временной характеристикой изменения.

Результаты. Итогом проведенного исследования является разработка алгоритма, предназначенного для поиска и классификации дефектов различных материалов. Разработан оптимальный алгоритм применения принципа персистентной гомологии к изображениям, проанализированы и выбраны факторы, определяющие переходные границы объектов изображения. Алгоритм сегментации опробован на изображениях металла, полученных с листопрокатного оборудования. Показаны результаты сравнения работы предложенного алгоритма с алгоритмами сегментации *k-means* и *Mean-Shift* при различных параметрах.

Заключение. Применение персистентной гомологии в задачах сегментации изображений может позволить создать инструмент, применимый к материалам с различной структурой без необходимости существенных изменений. Программная реализация процесса сегментации на основе применения принципов компьютерной топологии показала высокую гибкость благодаря сохранению истории изменения сегментов.

Ключевые слова: дефектоскопия; персистентные гомологии; сегментация; компьютерная топология.

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

Для цитирования: Еремеев С. В., Романов С. А. Алгоритм сегментации изображений на основе персистентной гомологии для решения задач поиска дефектов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 144-158. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-144-158>.

Поступила в редакцию 23.12.2019

Подписана в печать 30.01.2020

Опубликована 21.02.2020

An Algorithm of Image Segmentation Based on Persistent Homology for Solving Defects Searching Problems

Sergey V. Ereemeev¹ ✉, Semyon A. Romanov²

¹ Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs
23 Orlovskaya str., Murom 602264, Russian Federation

² SimbirSoft LLC
1 Narimanova av., Ulyanovsk 432001, Russian Federation

✉ e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop an image segmentation algorithm based on the persistent homology for solving problems of searching and classifying defects. The algorithm is aimed at improving the quality of products at enterprises with continuous production (metallurgy, woodworking, and others).

Methods. To segment an image, it is proposed to specify links between pixels in the image. In the future, during the iterative breaking of links, as their weights increase, pixels will be combined into groups called holes. Pixels that are in a single group have both their original characteristics and characteristics common for the entire group, and they also change the weights of their links with representatives of other groups. This creates a history of the formation of separate groups of pixels which can be specified as segments with a time-based characteristic of the change.

Results. The result of the research is the development of an algorithm designed to search for and classify defects in various materials. The optimal algorithm for applying the principle of persistent homology to images has been developed, and factors determining the transition boundaries of image objects have been analyzed and selected. The segmentation algorithm was tested on metal images obtained from sheet rolling equipment. The results of comparing the proposed algorithm with the K-means and Mean-Shift segmentation algorithms for different parameters are provided in the article.

Conclusion. Using persistent homology in image segmentation tasks can enable creating a tool that can be applied to materials with different structures without any need for significant changes. The software implementation of the segmentation process based on the principles of computer topology has shown high flexibility due to the storing of the history of segment changes.

Keywords: defect detection; persistent homology; segmentation; computer topology.

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

For citation: Ereemeev S. V., Romanov S. A. An Algorithm of Image Segmentation Based on Persistent Homology for Solving Defects Searching Problems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 144-158 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-144-158>.

Received 23.12.2019

Accepted 30.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Развитие промышленного сектора неизменно накладывает все более высокие требования к производству исход-

ных материалов. Это связано со сложностью производства конечной продукции и затратами на ее изготовление. С ростом этих показателей возрастает цена ошибки, допущенной в процессе

контроля качества исходных материалов. Качественный контроль может практически полностью исключить потери при изготовлении конечного продукта за счет отбраковки материала [1, 2].

На сегодняшний день основным методом контроля качества является человек. Несомненно, обученный специалист является наиболее точным методом определения качества. Но на линии производства, где изделия поступают непрерывно, очень большую роль играет человеческий фактор. Одним из таких факторов является «замыливание», т.е. эффект, при котором человек на протяжении долгого времени совершает одни и те же действия, вследствие чего перестаёт обращать внимание на мелкие детали, выпадающие из постоянного фокуса его внимания, и не замечает их изменений. Кроме того, есть и другие факторы, такие как эмоциональное состояние и состояние здоровья.

Одним из способов решения проблемы является введение автоматизированных систем контроля качества [3-5]. Такие системы дополняют ручную систему контроля качества, подсказывают специалисту, на что стоит обратить внимание. Например, сегментация изображения упрощает структуру материала, тем самым, снижая нагрузку на специалиста и повышая его производительность. Кроме того, сегментация позволяет привлекать специалиста только при необходимости, а именно, когда в поле зрения оказывается сегмент, напоминающий один из типов дефектов. Та-

ким образом, не только снижается нагрузка на специалиста и повышается его точность, но и увеличивается производительность систем контроля качества, понижается себестоимость продукции. Однако универсального метода для решения задачи сегментации не существует. Можно использовать производные функции, бинаризацию, фильтры Собеля и Превитта или использовать RGB составляющую. Но все эти методы имеют различные параметры в зависимости от области и условий применения, что делает затруднительным их использование в условиях постоянной изменчивости среды, например, изменение освещения и типа анализируемого материала [6-8].

Для решения задачи сегментации можно использовать топологические параметры, а именно персистентные гомологии, что позволит воссоздать дерево истории изменения сегментов, содержащего в себе информацию о полном диапазоне изменения порога яркостей [9-17].

Материалы и методы

Персистентная гомология подразумевает наличие дыр – групп пикселей, объединённых по цветовым характеристикам. Для объединения пикселей в группы необходимо представить изображение в виде списка объектов $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, где n – результат произведения размеров изображения. Каждый элемент списка $p_i = (c, x, y, h)$, где $i = \overline{1, n}$, содержит информацию о

положении пикселя, его яркости и то, к какой дыре он принадлежит. При этом $c = (r, g, b)$ – значение яркостей цветовых каналов пикселя, x – координата по оси X , y – координата по оси Y , h – дыра, которой принадлежит пиксель. Далее, необходимо установить список связей $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_m\}$, где m – общее количество связей. Каждый элемент списка $r_j = (p_1, p_2, l)$, где p_1, p_2 – информация о том, к каким точкам относится связь, i – величина расстояния между ними. Расстояние между точками измеряется по формуле (1) и напрямую зависит от величины яркости цветовых каналов выбранных точек. Согласно формуле (1) для определения расстояния между точками необходимо получить разность значения яркости каждого цветового канала пикселя, а затем посчитать среднеарифметическое значение разности всех каналов. После чего необходимо прибавить к значению разности каждого канала его отклонения от среднеарифметического значения разности:

$$l = \text{avg}(|c_1 - c_2| + ||c_1 - c_2| - \text{avg}(|c_1 - c_2|)|). \quad (1)$$

Функция avg обозначает вычисление среднеарифметического значения.

Такой подход позволит выделить зоны, цветовые каналы которых меняются с разной интенсивностью. При построении связей следует учитывать, что соединяются лишь соседние точки в плоскости OX и OY , соседние точки по диагонали не связываются между со-

бой. Таким образом, можно утверждать, что каждая точка, в зависимости от ее расположения, будет иметь до четырех связей.

Установив все связи между точками, необходимо отсортировать массив связей в порядке возрастания значения их длины l . Прделав подобные операции, мы получим некоторую схему связей (рис.1а). На рисунке представлена схема связей укрупненных пикселей, где белым цветом указаны связи между пикселями, а жирной белой линией выделена связь с наиболее низким значением длины l .

Дальнейший процесс подразумевает проход по списку связей и объединение пикселей в некоторые группы, называемые дырами h . Таким образом, обработав первую связь в списке, мы объединим p_1 и p_2 в дыру h , которой будет присвоено имя в соответствии с порядковым номером ее возникновения. На рис. 1б пиксели были объединены в дыру с именем 0. При этом вычисляется новое значение цвета для дыры, которое наследуется принадлежащим этой дыре точкам. Новое цветовое значение вычисляется по формуле $c = (c_1 + c_2) / 2$.

По мере обработки списка связей будут образовываться новые дыры. В случаях обработки связи между точкой и дырой точка поглощается дырой и приобретает цвет дыры, цвет дыры при этом не изменяется (рис. 2).

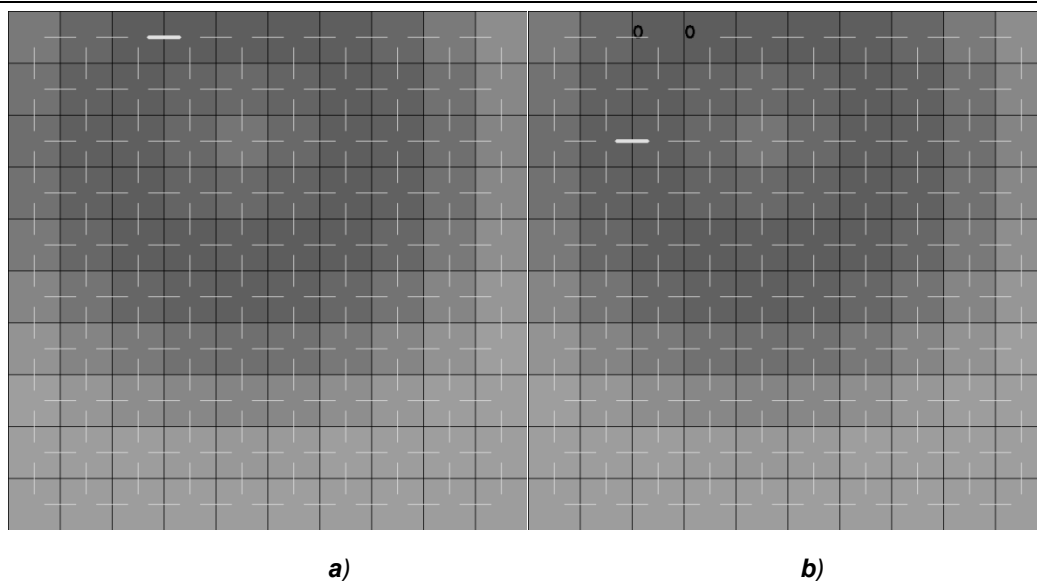


Рис. 1. Образование новой дыры: **a** – схема связей; **b** – новая дыра

Fig. 1. New hole formation: **a** – links scheme; **b** – new hole

При достаточном заполнении дырами возникают случаи, когда связь соединяет две точки, принадлежащие разным дырам (рис.3). В таком случае происходит перерасчет длины связи между этими объектами по формуле (1), после чего связь перемещается по списку свя-

зей в соответствии со своей новой длиной l .

В случае, если длина связи между дырами не может быть перемещена на новую позицию списка в соответствии с правилами сортировки, то происходит объединение двух дыр (рис.4).

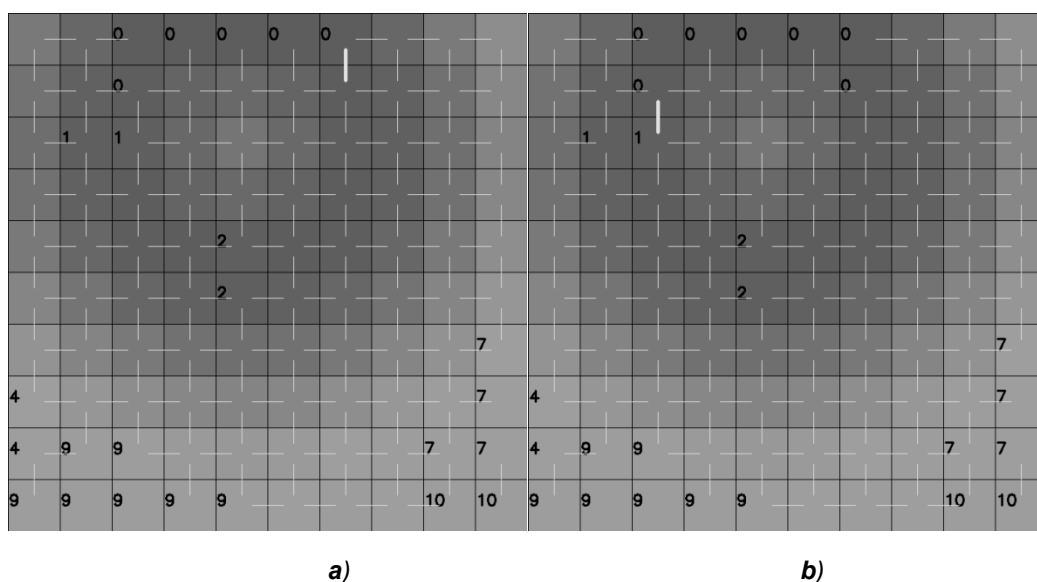


Рис. 2. Поглощение точки дырой: **a** – состояние перед поглощением; **b** – состояние после поглощения

Fig. 2. Point capture by hole: **a** – pre-capture state; **b** – post-capture state

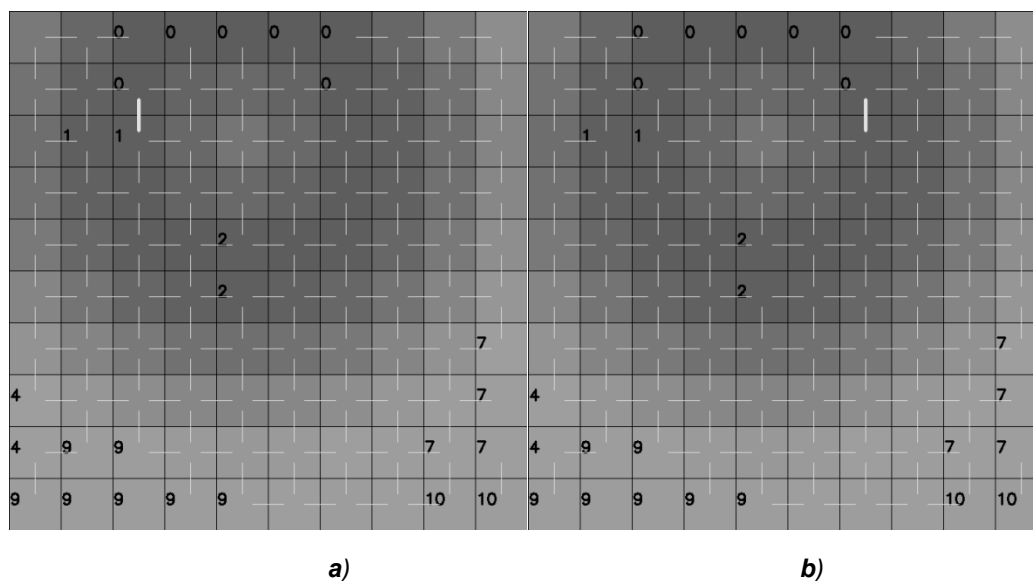


Рис. 3. Перерасчет связи между дырами: **a** – состояние перед переносом связи; **b** – состояние после переноса связи

Fig. 3. Recalculating the connection between holes: **a** – pre-connection state; **b** – post-connection state

При этом образуется новая дыра с присвоенным ей порядковым номером. В таком случае новый цвет дыры будет переопределен по формуле:

$$c = c_1 * d_1 + c_2 * d_2,$$

где d_1 – отношение общего количества точек двух дыр к количеству точек пер-

вой дыры; d_2 – отношение общего количества точек двух дыр к количеству точек второй дыры.

В процессе объединения обе дыры получают указатель на имя дыры, в которую они были объединены.

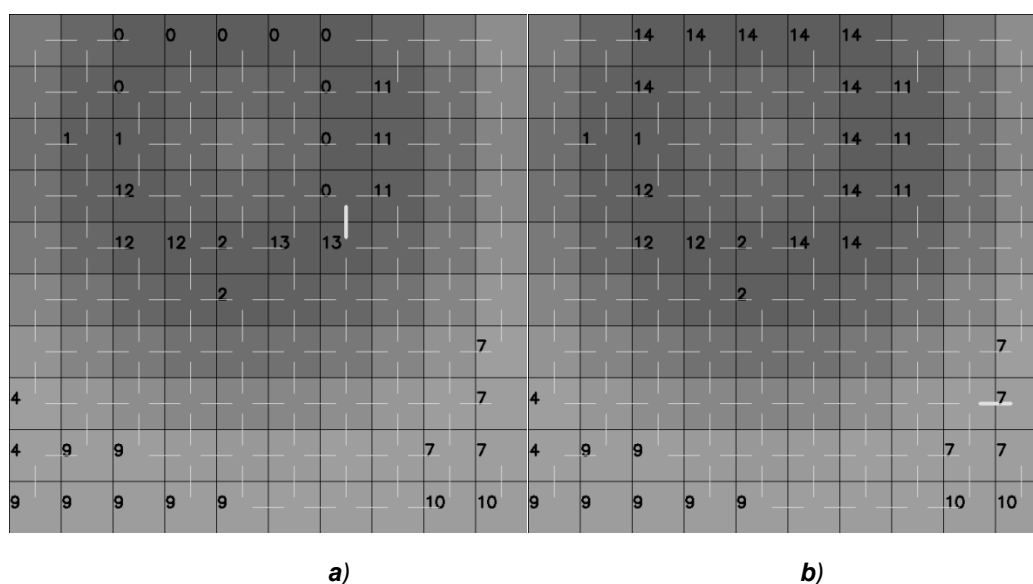


Рис. 4. Объединение двух дыр: **a** – состояние перед объединением; **b** – состояние после объединения

Fig. 4. Combining two holes: **a** – pre-combination state; **b** – post-combination state

В процессе обработки возникают случаи, когда между дырами возникает более одной связи (рис.5). Рассмотрим связи между дырами 29 и 30 (рис.5). В представленном случае будет переопределена и перенесена лишь первая связь между дырами. Остальные связи будут игнорироваться и считаться обработанными.

Кроме того, возникают случаи, когда в результате объединения двух дыр

сохраняются связи, соединяющие точки, принадлежащие одной и той же дыре. Такие связи считаются повторяющимися, они не подвергаются дальнейшей обработке и считаются обработанными (рис.6).

Процесс объединения будет продолжаться до тех пор, пока все точки не будут принадлежать одной дыре (рис.7).

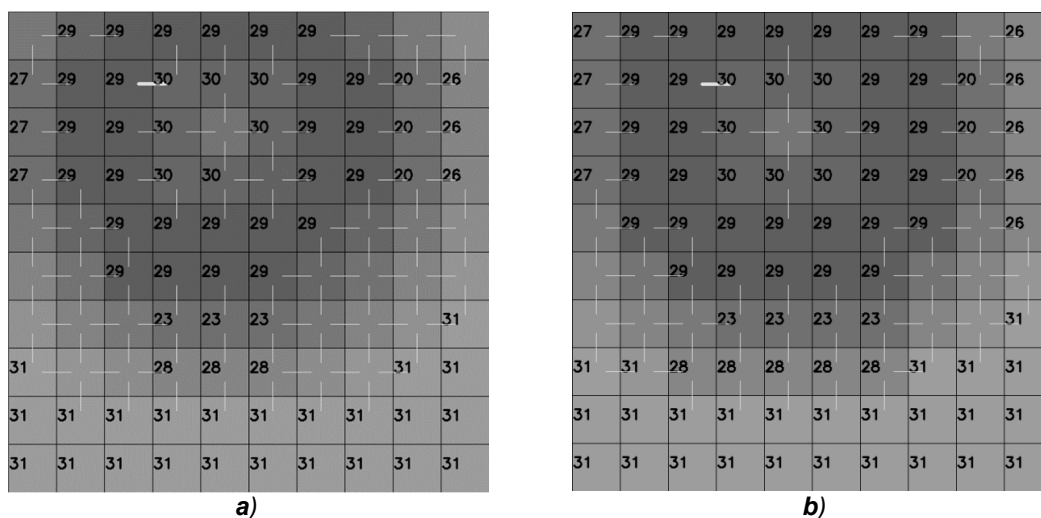


Рис. 5. Игнорирование ранее рассчитанных связей: **a** – состояние перед пропуском одинаковых связей; **b** – состояние после пропуска одинаковых связей

Fig. 5. Ignoring previously calculated links: **a** – state before skipping identical links; **b** – state after skipping identical links

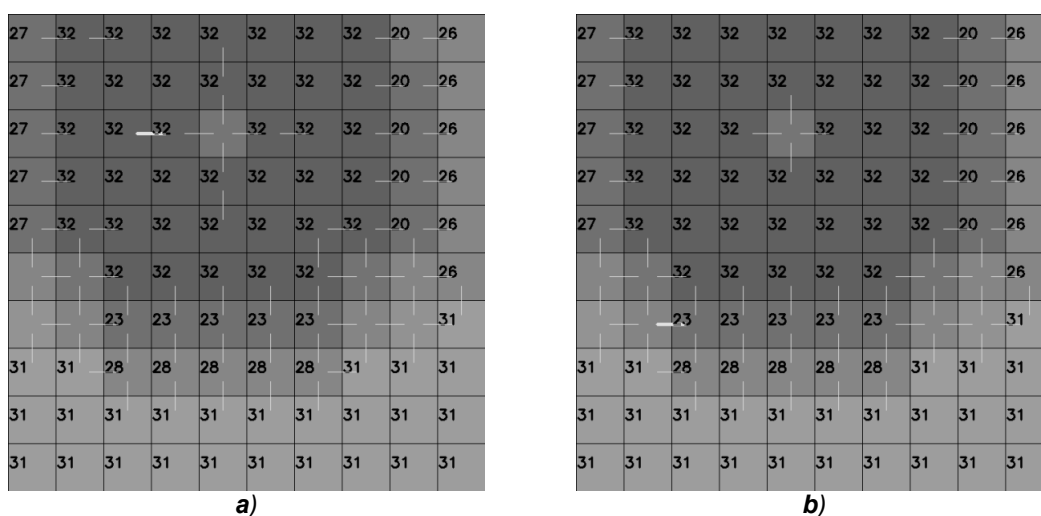


Рис. 6. Удаление связей – рудиментов: **a** – состояние перед удалением рудиментов; **b** – состояние после удаления рудиментов

Fig. 6. Removal of links - rudiments: **a** – state before removing links - rudiments; **b** – state after removing links - rudiments

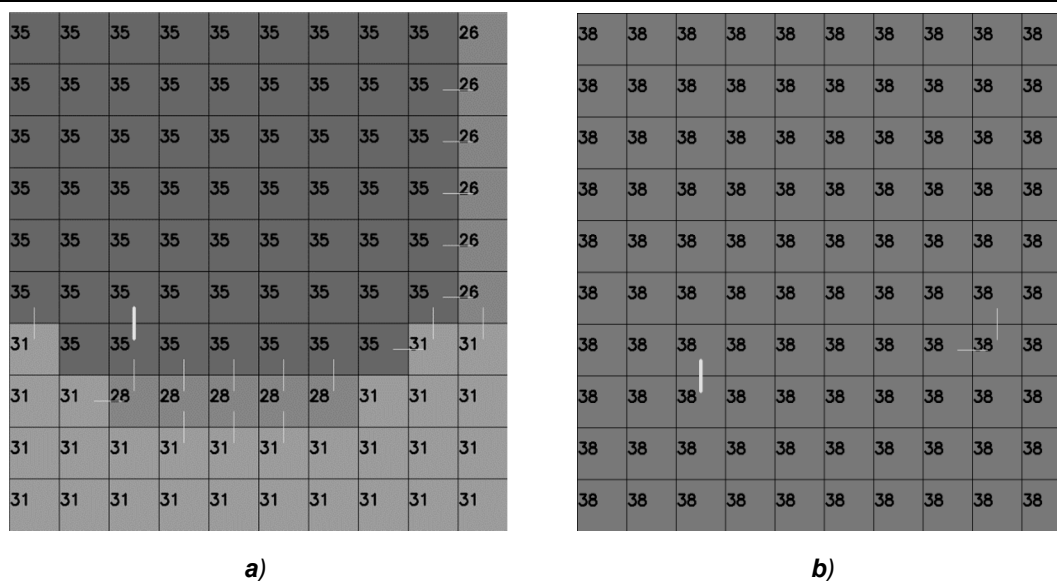


Рис. 7. Слияние в единый объект: **a** – один из финальных этапов объединения; **b** – заключительный этап объединения

Fig. 7. Merge into a single object: **a** – one of the final stages of the merger; **b** – final stage of the merger

Результаты и их обсуждение

Для реализации предлагаемого алгоритма было разработано приложение на языке C#. Применение разработанного алгоритма позволит сегментировать изображения с дефектами, сохраняя при этом всю историю преобразований. Таким образом, можно утверждать, что результатом работы является сегментация, содержащая в себе все возможные вариации при изменении порогового значения яркости. В процессе разработки программного обеспечения предусмотрена возможность визуализации с выбором текущей итерации, которая эквивалентна значению порога яркости. Также предусмотрено выделение области дыры в текущей итерации (рис.8).

Технически сегментирование реализовано при помощи установки пикселю принадлежности к той или иной дыре для различных интервалов яркости. Проведенные эксперименты показали, что соотношения размеров дыр и их цветовых значений могут выступать в качестве признака обнаружения и классификации дефекта. Выбранные параметры будут значительно отличаться от типа дефекта и анализируемого материала.

Для экспериментов использовались изображения листов металла с дефектами и без (рис.9).

На рис. 10 представлены сегментированные варианты изображений рис. 9 при пороговом значении яркости со значением 31.

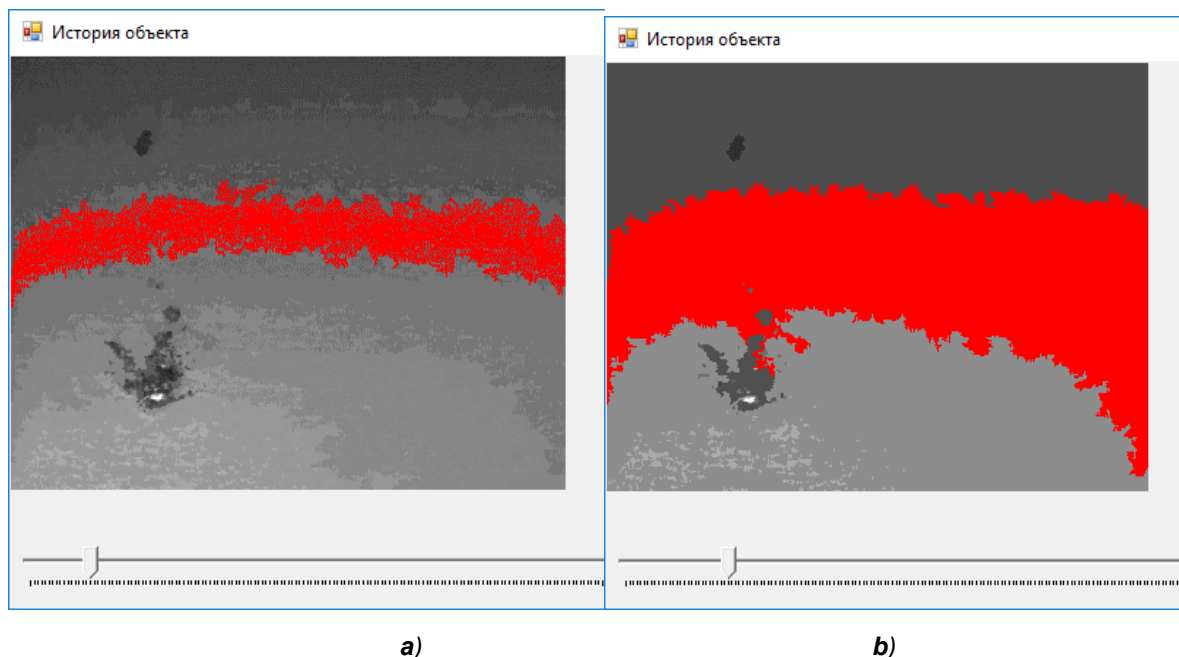


Рис. 8. Окно выделения области дыры: **a** – значение порога яркости 16; **b** – значение порога 28

Fig. 8. Window for hole area selection: **a** – brightness threshold value is 16; **b** – threshold value is 28

Для поиска порога, при котором предполагается возникновение дефекта, можно выделить числовую характеристику, которая будет показывать, какое количество дыр определенной площади присутствует на изображении для раз-

личных пороговых значений, примененных к рис. 9а (табл.1). В табл. 1 отчетливо наблюдается, что с увеличением значения порога уменьшается общее количество дыр, но увеличивается площадь оставшихся.

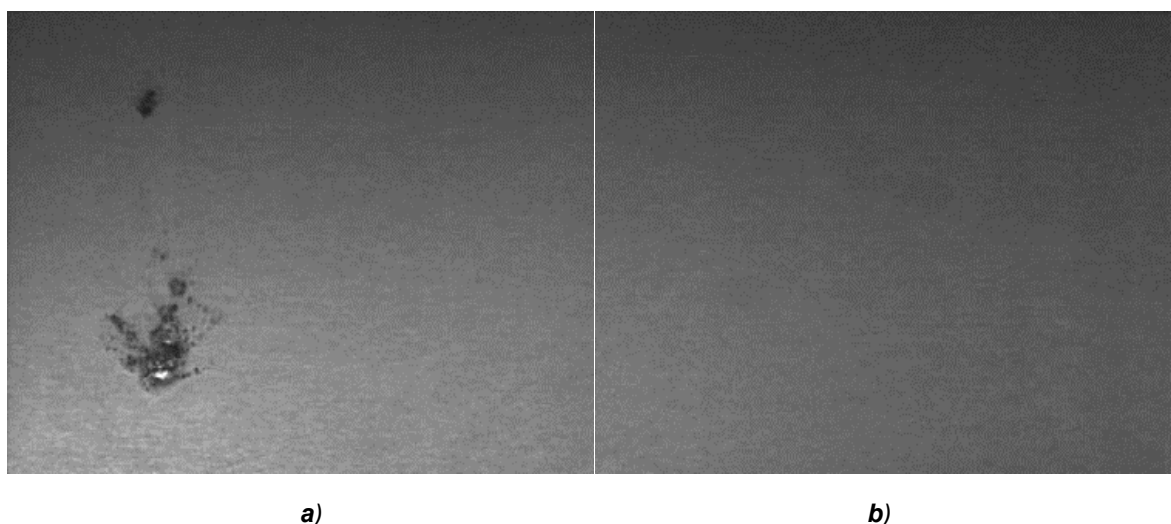


Рис. 9. Изображение металла: **a** – с дефектом; **b** – без дефекта

Fig. 9. Metal Image: **a** – defected; **b** – free from defects

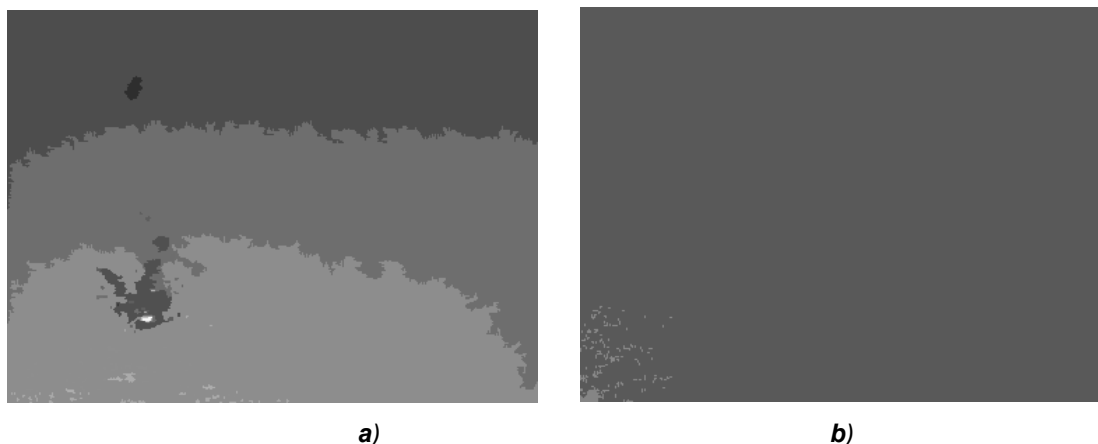


Рис. 10. Сегментированные изображения металла: **a** – с дефектом; **b** – без дефекта

Fig. 10. Segmented metal images: **a** – defected; **b** – free from defects

Таблица 1. Количество дыр в диапазонах отношения площадей для указанного порогового значения

Table 1. Number of holes in the area ratio ranges for the specified threshold value

Порог	Количество дыр при процентном соотношении площади дыры к общей площади					
	0-0,05	0,05-1	1-20	20-30	30-50	50-100
16	3802	33	7	0	0	0
20	425	13	0	2	1	0
28	204	8	0	2	1	0
31	46	3	0	2	1	0
48	15	2	0	1	0	1
153	0	0	0	0	0	1

Сравнительный анализ с другими методами сегментации показал, что для выделения конкретного дефекта требуется тонкая настройка [18-20]. Так же следует учитывать, что даже при настройке на конкретный дефект участок дефекта не является единым сегментом, а все еще разделен на несколько кластеров. В случае с сегментацией методом k-means следует выбрать необходимое число кластеров для того, чтобы четко выделить все дефекты изображения (рис.11, a-b). В результате для обнаружения всех дефектов на рис. 9,а необходимо как минимум два прохода алгоритма.

В отличие от k-means в алгоритме сегментации Mean-Shift не нужно указывать количество кластеров, но необходимо указывать пространственный радиус маски, радиус цветовой маски и максимальный уровень пирамиды сегментации. Это также осложняет процесс настройки под конкретный материал или дефект (рис.11, c-d). Кроме того, участки дефектов не образуют единого сегмента, а скорее разбивают его на несколько частей. Однако следует заметить, что применение Mean-Shift в качестве фильтра изображения перед применением алгоритма, предложенного в статье, позволяет увеличить производительность на 40% (рис.11, e-f).

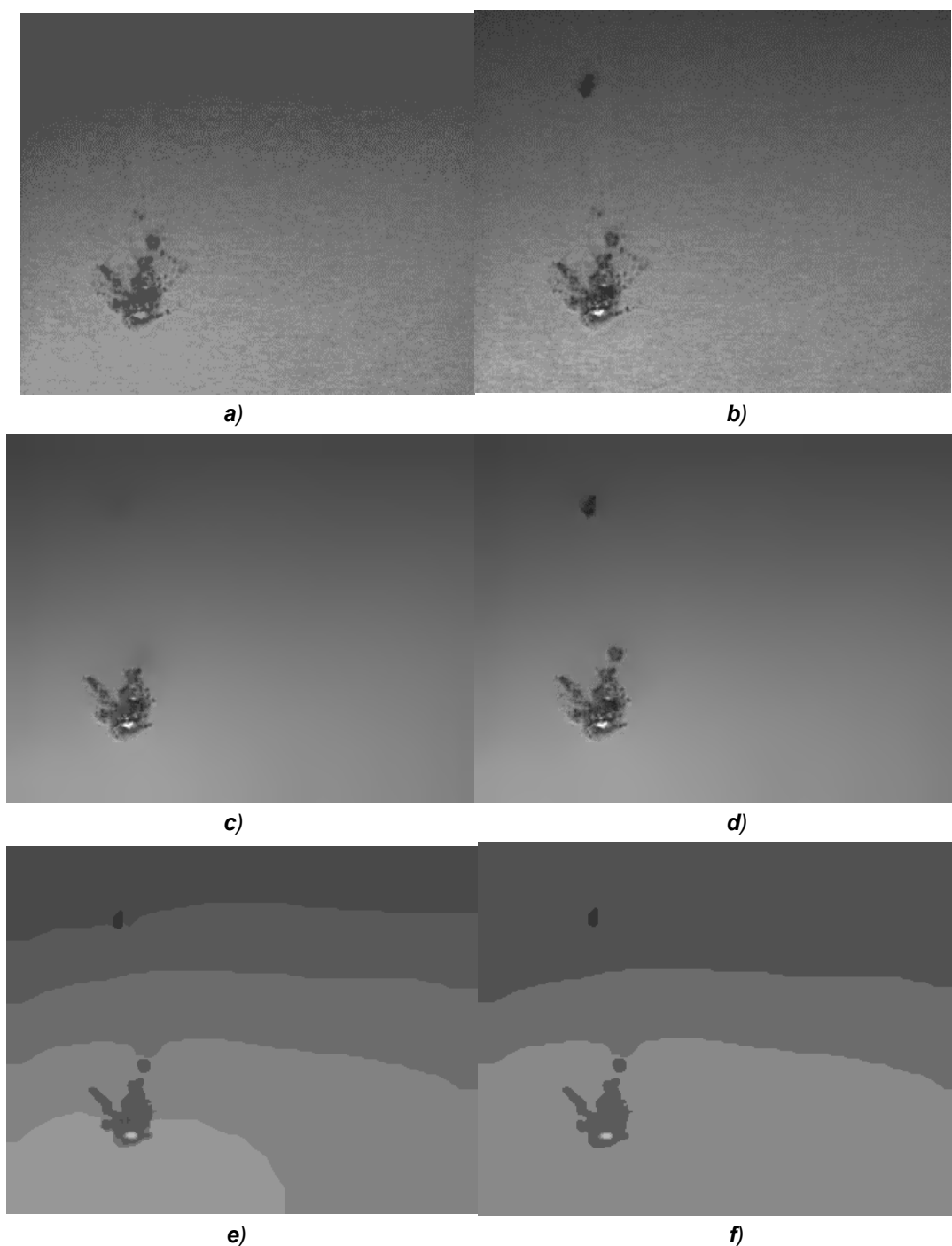


Рис. 11. Сегментация изображения различными алгоритмами: **a** – k-means при 5 кластерах; **b** – k-means при 9 кластерах; **c** – Mean-Shift, где пространственный радиус маски равен 20, радиус цветовой маски равен 25, максимальный уровень пирамиды сегментации равен 3; **d** – Mean-Shift с аналогичными параметрами, которые равны 15, 20 и 3 соответственно; **e** – Mean-Shift и основной алгоритм на 14-ой итерации; **f** – Mean-Shift и основной алгоритм на 26-ой итерации

Fig. 11. Segmentation of the image by means of different algorithms: **a** – k-means for 5 clusters; **b** – k-means for 9 clusters; **c** – Mean-Shift where the spatial mask radius is 20, the color mask radius is 25, the maximum level of the segmentation pyramid is 3; **d** – Mean-Shift with similar parameters that are equal to 15, 20 and 3 respectively (**d**); **e** – Mean-Shift and basic algorithm at 14th iteration; **f** – Mean-Shift and basic algorithm at 26th iteration

Выводы

Разработан алгоритм сегментации изображений различных материалов, основанный на методах персистентной гомологии. Разработанная модель устанавливает каждому пикселю принадлежность к некоторой группе, называемой дырой. В свою очередь, дыры содержат информацию об интервале значений яркости, для которого дыра считается активной. Выход за границы данного интервала указывает на то, что для данного значения яркости активной является одна из родительских дыр, чей

интервал жизни включает в себя текущее значение яркости. Данная методология позволяет анализировать изображение, основываясь на информации всего объединения пикселей для всех пороговых значений яркости. Подобный подход позволит анализировать различные материалы без необходимости перезапуска алгоритма с новым пороговым значением яркости. Это позволит применять данный алгоритм в условиях производства с непостоянными значениями окружения, таких как освещение, тип материала и тип дефекта.

Список литературы

1. Илющенко А. В. Анализ методов обработки изображений пиломатериалов, имеющих пороки и дефекты // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 218. С. 153–163.
2. Цапаев А. П., Кретинин О. В. Методы сегментации изображений в задачах обнаружения дефектов поверхности // Компьютерная оптика. 2012. № 36(3). С. 448–452.
3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. Vol. 39. P. 2481–2495.
4. Learning Video Object Segmentation from Static Images / F. Perazzi, A. Khoreva, R. Benenson, B. Schiele, A. Sorkine-Hornung // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 2663–2672.
5. Panoptic Segmentation / A. Kirillov, K. He, R. Girshick, C. Rother, P. Dollar // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 9404–9413.
6. A multi-scale 3D Otsu thresholding algorithm for medical image segmentation / Y. Feng, H. Zhao, X. Li, X. Zhang, H. Li // Digital Signal Processing. 2017. Vol. 60. P. 186–199.
7. Head and neck target delineation using a novel PET automatic segmentation algorithm / B. Berthon, M. Evans, C. Marshall, N. Palaniappan, N. Cole, V. Jayaprakasam, T. Rackley, E. Spezi // Radiotherapy and Oncology. 2017. Vol. 122. P. 242–247.
8. Real-Time Superpixel Segmentation by DBSCAN Clustering Algorithm / J. Shen, X. Hao, Z. Liang, Y. Liu, W. Wang, L. Shao // IEEE Transactions on Image Processing. 2016. Vol. 25. P. 5933–5942.

9. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Титов В.С. Алгоритм совмещения пространственных объектов разномасштабных карт на основе топологического анализа данных // Компьютерная оптика. 2019. № 43(6). С. 1021–1029.
10. Андрианов Д. Е., Еремеев С. В., Купцов К. В. Алгоритм семантической классификации пространственных объектов и сцен с использованием топологических признаков и классификатора random forest на многомасштабных картах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 4. С. 8–18.
11. Eremeev S., Seltsova E. Algorithms for Topological Analysis of Spatial Data // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 902. P. 81 – 92.
12. Еремеев С.В., Сельцова Е.А. Алгоритм топологического анализа пространственных структур в геоинформационных системах // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2017. № 1. С. 16–27.
13. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology. An introduction. AMS, Providence. 2010.
14. Kurlin V. A fast persistence-based segmentation of noisy 2d clouds with provable guarantees // Pattern Recognition Letters. 2016. Vol. 83. P. 3–12.
15. Распознавание текстур на цифровых изображениях методами вычислительной топологии / Н.Г. Макаренко, Ф.А. Уртъев, И.С. Князева, Д.Б. Малкова, И.Т. Пак, Л.М. Каримова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. № 12(1). С. 131–144.
16. Eremeev S., Kuptsov K., Romanov S. An approach to establishing the correspondence of spatial objects on heterogeneous maps based on methods of computational topology // Lecture Notes in Computer Science. 2018. Vol. 10716. P. 172–182.
17. Алгоритм идентификации пространственных объектов растровой карты на основе топологического анализа данных / С.В. Еремеев, Д.Е. Андрианов, К.В. Купцов, Ю.А. Ковалев // Телекоммуникации. 2017. № 7. С. 39–44.
18. Room segmentation: Survey, implementation, and analysis / R. Bormann, F. Jordan, W. Li, J. Hampp, M Hägele // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016. P. 1018–1026.
19. El-Khatib S., Skobtsov Y., Rodzin S. Theoretical and Experimental Evaluation of Hybrid ACO-k-means Image Segmentation Algorithm for MRI Images Using Drift-analysis // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 150. P. 324–332.
20. Kavzoglu T., Tonbul H. A comparative study of segmentation quality for multi-resolution segmentation and watershed transform // 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2017. P. 113–117.

References

1. Ilyushchenko A. V. Analiz metodov obrabotki izobrazhenij pilomaterialov, imeyushchih poroki i defekty [Analysis of methods for processing images of lumber with flaws and

defects]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = Izvestia of the St. Petersburg Academy of Forestry Engineering*, 2017, no. 218, pp. 153–163 (in Russ.).

2. Capaev A. P., Kretinin O. V. Metody segmentacii izobrazhenij v zadachah obnaruzheniya defektov poverhnosti [Image segmentation methods in problems of surface defect detection]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 448–452 (in Russ.).

3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39, pp. 2481–2495.

4. Perazzi F., Khoreva A., Benenson R., Schiele B., Sorkine-Hornung A. Learning Video Object Segmentation from Static Images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2663–2672.

5. Kirillov A., He K., Girshick R., Rother C., Dollar P. Panoptic Segmentation. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 9404–9413.

6. Feng Y., Zhao H., Li X., Zhang X., Li H. A multi-scale 3D Otsu thresholding algorithm for medical image segmentation. *Digital Signal Processing*, 2017, vol. 60, pp. 186–199.

7. Berthon B., Evans M., Marshall C., Palaniappan N., Cole N., Jayaprakasam V., Rackley T., Spezi E. Head and neck target delineation using a novel PET automatic segmentation algorithm. *Radiotherapy and Oncology*, 2017, vol. 122, pp. 242–247.

8. Shen J., Hao X., Liang Z., Liu Y., Wang W., Shao L. Real-Time Superpixel Segmentation by DBSCAN Clustering Algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, vol. 25, pp. 5933–5942.

9. Eremeev S.V., Andrianov D.E., Titov V.S. Algoritm sovmeshcheniya prostranstvennyh ob"ektov raznomasshtabnyh kart na osnove topologicheskogo analiza dannyh [An algorithm for matching spatial objects of different-scale maps based on topological data analysis]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 6, pp. 1021–1029 (in Russ.).

10. Andrianov D. E., Eremeev S. V., Kuptsov K. V. Algoritm semanticheskoy klassifikacii prostranstvennyh ob"ektov i scen s ispol'zovaniem topologicheskikh priznakov i klassifikatora random forest na mnogomasshtabnyh kartah [Algorithm of semantic classification of spatial objects and scenes using topological features and random forest classifier on multiscale maps]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Sea Journal: Management and High Technology*, 2018, no. 4, pp. 8–18 (in Russ.).

11. Eremeev S., Seltsova E. Algorithms for Topological Analysis of Spatial Data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 902, pp. 81–92.

12. Eremeev S.V., Seltsova E.A. Algoritm topologicheskogo analiza prostranstvennyh struktur v geoinformacionnyh sistemah [Algorithm of topological analysis of spatial structures in geographic information systems]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannyh = Algorithms, methods, and data processing systems*, 2017, no. 1, pp. 16–27 (in Russ.).

13. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology. An introduction. AMS, Providence, 2010.
14. Kurlin V. A fast persistence-based segmentation of noisy 2d clouds with provable guarantees. *Pattern Recognition Letters*, 2016, vol. 83, pp. 3–12.
15. Makarenko N.G., Urtev F.A., Knyazeva I.S., Malkova D.B., Pak I.T., Karimova L.M. Raspoznavanie tekstur na cifrovyyh izobrazheniyah metodami vychislitel'noj topologii [Recognition of textures in digital images using computational topology methods]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 131–144 (in Russ.).
16. Ereemeev S., Kuptsov K., Romanov S. An approach to establishing the correspondence of spatial objects on heterogeneous maps based on methods of computational topology. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 10716, pp. 172–182.
17. Ereemeev S.V., Andrianov D.E., Kuptsov K.V., Kovalev Y.A. Algoritm identifikatsii prostranstvennykh ob"ektov rastrovoj karty na osnove topologicheskogo analiza dannykh [Algorithm for identification of spatial objects in a raster map based on topological data analysis]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2017, no. 7, pp. 39–44 (in Russ.).
18. Bormann R., Jordan F., Li W., Hampp J., Hägele M. Room segmentation: Survey, implementation, and analysis. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 1018–1026.
19. El-Khatib S., Skobtsov Y., Rodzin S. Theoretical and Experimental Evaluation of Hybrid ACO-k-means Image Segmentation Algorithm for MRI Images Using Drift-analysis. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 150, pp. 324–332.
20. Kavzoglu T., Tonbul H. A comparative study of segmentation quality for multi-resolution segmentation and watershed transform. *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 2017, pp. 113–117.

Информация об авторах / Information about the Authors

Еремеев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром, Российская Федерация, e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Sergey V. Ereemeev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Information Systems, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: sv-eremeev@yandex.ru

Романов Семен Алексеевич, магистр информационных систем, старший разработчик, ООО «СимбирСофт», г. Ульяновск, Российская Федерация, e-mail: cwwc@bk.ru

Semyon A. Romanov, Master of Information Systems, Senior Developer, SimbirSoft LLC, Ulyanovsk, Russian Federation, e-mail: cwwc@bk.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>

Применение нейронных сетей в задаче количественного анализа состава воздушной среды

О.Г. Бондарь¹, Е.О. Брежнева¹✉, Р.Е. Чернышов¹

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель исследования: разработка методики генерации обучающих данных с целью обеспечения возможности использования метода искусственных нейронных сетей (ИНС) в газоаналитических системах. Рассматривается проблема повышения точности раздельного определения концентраций газов в многокомпонентных смесях в условиях колебания параметров окружающей среды. Повысить точность определения концентраций целевых газов предлагается за счет применения метода ИНС для совместной обработки сигналов датчиков.

Методы. Генерация обучающих данных для нейронной сети осуществлялась с помощью численного эксперимента и методов математического моделирования. Для оценки точности обучения было использовано среднее квадратическое отклонение (СКО) и рассчитывалась относительная погрешность. Обучение и исследование ИНС проводилось в среде MATLAB (приложение Neural Networks Toolbox). При разработке математических моделей датчиков газа опирались на теорию электрических цепей, электронную теорию хемосорбции и адсорбционную теорию гетерогенного катализа.

Результаты. Описана методика генерации обучающих наборов данных с использованием математических моделей газочувствительных датчиков. Предложенная методика обучения апробирована на конкретной задаче, в частности, разработано решающее устройство на основе ИНС для четырёхкомпонентного газоанализатора. Проведена оценка эффективности применения нейронных сетей для отстройки от взаимной перекрестной чувствительности датчиков.

Заключение. Предложена методика генерации обучающих данных с помощью имитационных моделей, позволяющая автоматизировать процесс обучения, исследования, выбора архитектуры и структуры ИНС и их тестирования. Проведена апробация метода. На основании анализа полученных погрешностей, сформулированы выводы об эффективности применения нейронных сетей для уменьшения погрешностей, вызванных перекрестной чувствительностью, при различных соотношениях концентраций основного и мешающего газов.

Ключевые слова: газочувствительные датчики; искусственные нейронные сети; обучение сети; имитационные модели; обработка информации; концентрация газа; погрешности измерения.

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

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Чернышов Р.Е. Применение нейронных сетей в задаче количественного анализа состава воздушной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 159-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-159-174>.

Поступила в редакцию 14.12.2019

Подписана в печать 20.01.2020

Опубликована 21.02.2020

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Чернышов Р.Е., 2020

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 24(1): 159-174

Application of Neural Networks in the Problem of Quantitative Analysis of Air Composition

Oleg G. Bondar¹, Ekaterina O. Brezhnev¹ ✉, Rostislav E. Chernyshov¹

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a method for generating training data to enable the use of artificial neural networks (ANN) method in gas analyzer systems. The problem of increasing the accuracy of separate determination of gas concentrations in multicomponent mixtures under conditions of environmental parameters changes is considered. It is proposed to increase the accuracy of determining target gas concentrations by using the ANN method for joint processing of sensor signals.

Methods: Training data for the neural network were generated using numerical experiments and mathematical simulation methods. To assess the accuracy of training, the standard deviation (SD) was used and the relative error was calculated. ANN training and research were conducted in the MATLAB environment (the Neural Networks Toolbox application). When developing mathematical models of gas sensors, the theory of electrical circuits, electronic theory of chemisorption and the adsorption theory of heterogeneous catalysis were applied.

Results: A method for generating training data sets using mathematical models of gas sensors is described. The proposed training method has been tested on a specific task, in particular, a decision-making device based on ANN for a four-component gas analyzer has been developed. The efficiency of using neural networks for tuning out from the mutual cross-sensitivity of sensors was evaluated.

Conclusion: A method for generating training data using simulation models is proposed, which allows automating the process of training, research, choosing the architecture and structure of ANN and their testing. The method was tested. Based on the analysis of the obtained errors, conclusions are made about the efficiency of using neural networks to reduce errors caused by cross sensitivity at different concentrations of the main and interfering gases.

Keywords: gas sensors; artificial neural networks; network learning; simulation models; information processing; gas concentration; measurement errors.

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

Funding: The research was carried out with the support of RFBR grant 19-08-00440.

For citation: Bondar O. G., Brezhnev E. O., Chernyshov R.E. Application of Neural Networks in the Problem of Quantitative Analysis of Air Composition // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 159-174 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>.

Received 14.12.2019

Accepted 20.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

В автономных газоанализаторах и сложных газоаналитических системах

широко применяются полупроводниковые и термокаталитические датчики,

обладающие высокой стабильностью характеристик. Датчики таких типов реагируют не только на основной газ, но и обладают различной степенью чувствительности к целому ряду других мешающих газов, к колебаниям относительной влажности воздуха, давления и температуры, что приводит к дополнительным погрешностям измерений. Сигнал каждого газочувствительного датчика представляет собой реакцию на совокупность сразу нескольких внешних воздействий, поэтому перспективным направлением является применение совместной обработки информации, поступающей с каждого датчика газоаналитической системы. Для решения задач количественного и качественного анализа состава сложных газовых смесей высокую эффективность показывает метод ИНС [1-6].

Применение нейронной сети в газоанализаторах требует значительного объема обучающих и тестирующих данных, необходимых для проведения исследований, направленных на поиск оптимальной структуры сети, ее обучения, контроля эффекта «переобучения» и тестирования. Получение обучающих данных экспериментальным путем делает применение метода нецелесообразным в связи с высокой стоимостью и трудоемкостью работ.

Снять это ограничение может позволить разработка методики обучения ИНС, базирующейся на основе имитационного моделирования. Для реализа-

ции данного подхода необходимо иметь многопараметрические математические модели датчиков, учитывающие основные факторы, влияющие на их выходной сигнал.

Материалы и методы

Математически исходную задачу можно описать в виде системы, состоящей из n уравнений (n – число датчиков, входящих в состав системы), параметрами которой являются концентрации газов (C), относительная влажность воздуха (RH), температура воздуха (T), атмосферное давление (P) [7]:

$$\begin{cases} S_1 = f_1(C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_k, T, P, RH) \\ \vdots \\ S_j = f_j(C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_k, T, P, RH) \\ \vdots \\ S_k = f_k(C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_k, T, P, RH) \end{cases}$$

Решение задачи сводится к нахождению функций обратного преобразования:

$$\begin{cases} C_1 = F_1(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_k, T, P, RH) \\ \vdots \\ C_j = F_j(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_k, T, P, RH) \\ \vdots \\ C_k = F_k(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_k, T, P, RH) \end{cases}$$

Применение метода ИНС позволит получить решение в аналитическом виде.

Обученная сеть должна преобразовывать сигналы S_i , поступающие на ее вход с основных и вспомогательных датчиков, в искомые концентрации газов c_i :

$$(s_1, s_2, \dots, s_{k+3})^T \rightarrow (c_1, c_2, \dots, c_k)^T.$$

К основным датчикам относятся газочувствительные датчики, к вспомогательным – датчики температуры, влажности, давления.

Исходные сигналы нормируются в заданном диапазоне (0-1), границы диапазона должны удовлетворять свойствам выбранной функции активации нейронов.

Выбор архитектуры и разработка структуры сети осуществляется эмпирически и требует большого количества обучающих и тестирующих данных, представляющих собой различные комбинации входных параметров и соответствующие им сигналы датчиков. Комбинации входных параметров (концентрации газов, параметры окружающей среды) должны быть сгенерированы случайным образом, чтобы максимально близко имитировать реальные условия работы газоанализатора. Получение таких выборок экспериментальным путем делает применение нейронных сетей в газоаналитических приборах невозможным, в связи с высокой стоимостью и трудоёмкостью работ. В данной работе генерацию обучающих данных предлагается осуществлять, используя методы имитационного моделирования.

Суть метода заключается в том, что в качестве уравнений системы используются математические модели датчиков, обладающие интерполяционными и экстраполяционными свойствами и

$$\frac{R_s}{R_0} = \frac{1}{(A_1 + A_2 (C_{H_2O} \frac{P}{P_o})^{n_1} + A_3 (C_{H_2O} \frac{P}{P_o})^{n_1} (C_{CO} \frac{P}{P_o})^{n_2} + A_4 (C_{CO} \frac{P}{P_o})^{n_2} + \dots + A_6 (C_{H_2O} \frac{P}{P_o})^{n_1} (C_{H_2} \frac{P}{P_o})^{n_3} + A_7 (C_{H_2} \frac{P}{P_o})^{n_4}) \times e^{A_8 (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} + A_5}, \quad (1)$$

где R_s – измеренное сопротивление датчика;

C_{CO} – концентрации монооксида углерода (об. %);

учитывающие максимальное число факторов, влияющих на выходной сигнал. Для обеспечения выше перечисленных свойств математические модели разрабатывались с учетом принципа работы датчиков, опираясь на протекающие в них физические и химические процессы. Математические модели модернизировались и разрабатывались для основных типов датчиков, выпускаемых промышленностью: полупроводниковых, термokatалитических, оптических и электрохимических [8]. Для оптических датчиков использовалась модернизированная модель, в которой были учтены влияния температуры и давления окружающего воздуха, для электрохимических датчиков использовалась уже существующая модель. Нахождение неизвестных параметров математических моделей реализовано в среде *MALAB* с помощью встроенной функции *lsqcurvefit* на основании параметров и характеристик, представленных производителем в технической документации конкретных датчиков.

Ниже представлена разработанная ранее математическая модель полупроводникового датчика монооксида углерода [8]:

C_{H_2O} – концентрация водяных паров (об. %);

C_{H_2} – концентрация водорода (об. %);

A_1 – A_5 , n_i – константы, определяемые при параметризации;

T_0 , P_0 – температура и атмосферное давление, при которых осуществлялась калибровка датчика;

P – атмосферное давление (кПа)

T – температура (К).

Для нахождения неизвестных параметров модели использовалась техническая документация на полупроводниковый датчик монооксида углерода

TGS2442 (производитель *Figaro*). При нахождении коэффициентов у концентраций газов параметры окружающей среды соответствовали нормальным условиям ($P=101.3$ кПа, $T=293,15$ К, $RH=50\%$). По результатам нахождения неизвестных параметров математической модели (1) получены следующие значения максимальных относительных погрешностей ($\sigma_{\max}$) (табл.1).

Таблица 1. Погрешности параметризации математической модели датчика CO

Table 1. Parameterization errors of the mathematical model of the CO sensor

Варьируемый фактор и диапазон изменения	Дополнительные условия параметризации	$\sigma_{\max}$
C_{CO} (0,003 – 0,1 об. %)	В отсутствии водорода	5,00 %
C_{H_2} (0,003 – 0,1 об. %)	В отсутствии монооксида углерода	0,91 %
T (283,15 К - 313,15 К)	$C_{CO}=0,01$ об. %, в отсутствии водорода	6,02 %

Проведена оценка устойчивости разработанной математической модели на тестирующих данных, которые не были задействованы при параметризации (при нормальных условиях). В табл. 2 сопоставлены результаты параметризации ($\sigma_{\text{пар}}$) и тестирования ($\sigma_{\text{тест}}$) разработан-

ной математической модели полупроводникового датчика.

Используя выражения (1), исследовались экстраполяционные свойства модели относительно влияния факторов окружающей среды (относительной влажности и температуры воздуха) при различных концентрациях целевого газа.

Таблица 2. Результаты оценки устойчивости математической модели

Table 2. The results of evaluating the stability of the mathematical model

Варьируемый фактор и диапазон изменения	Дополнительные условия параметризации	$\sigma_{\text{пар}}$	$\sigma_{\text{тест}}$
C_{CO} (0,003 – 0,1 об. %)	В отсутствии водорода	0,24	0,22
C_{H_2} (0,003 – 0,1 об. %)	В отсутствии угарного газа	0,67	0,62
RH (10 - 90%)	В чистом воздухе	0,43	0,42
T (268,15 К – 323 К)	$C_{CO}=0,01$ об. %, в отсутствии водорода	3,95	3,71

На рис. 1 представлены многопараметрические графики, демонстрирующие изменение выходного сигнала датчика при варьировании влажности воздуха и различных значениях концентраций целевого газа (температура и давление соответствуют нормальным условиям, мешающий газ отсутствует), полученные с помощью разработанной математической модели и предоставленные производителем.

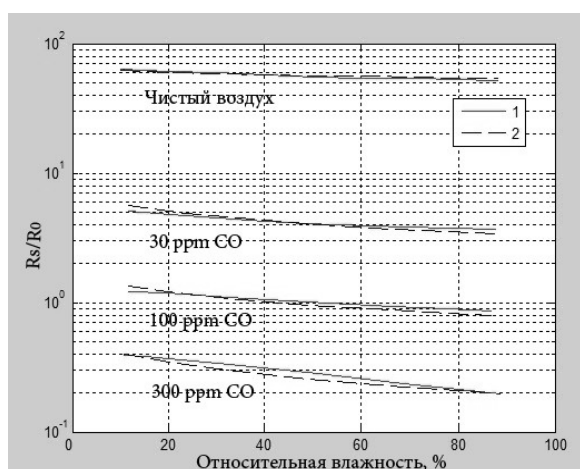


Рис. 1. Результаты моделирования влияния влажности в чистом воздухе и в присутствии CO: 1 – данные производителя; 2 – результат моделирования

Fig. 1. The results of modeling the effect of humidity in clean air and in the presence of CO: 1 – manufacturer's data; 2 – simulation result

На рис. 2 представлены графики, отражающие зависимость сопротивления датчика от колебаний температуры окружающей среды при различных концентрациях монооксида углерода (давление и относительная влажность воздуха соответствуют нормальным условиям, мешающий газ отсутствует), представ-

ленные производителем и полученные с помощью математической модели (1).

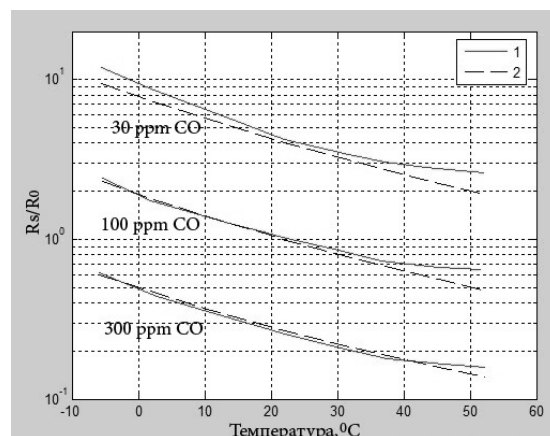


Рис.2. Результаты моделирования влияния температуры в присутствии CO: 1 – данные производителя; 2 – результат моделирования

Fig. 2. The results of modeling the effect of temperature in the presence of CO: 1 – manufacturer data; 2 – simulation result

В табл. 3 представлены значения полученных погрешностей, характеризующие расхождения реальных данных и результатов моделирования влияния факторов окружающей среды (относительной влажности и температуры воздуха).

Максимальная погрешность (при 0,03 об. % CO) соответствует температурам свыше 318,15 K, в диапазоне температур от 268,15 K до 318,15 K ее значение менее 5,95%.

Анализ значений погрешностей, полученных при тестировании и исследовании экстраполяционных свойств математической модели, а именно, зависимости сопротивления датчика от концентрации целевого газа при нормальных условиях, при изменении относительной влажности воздуха и температуры в ра-

бочем диапазоне при различных концентрациях монооксида углерода, позволяет судить об адекватности разработанной математической модели.

Аналогичным образом была разработана и исследована математическая модель для термokatалитических датчиков [9-11]. Параметризация модели и

оценка погрешностей моделирования осуществлялась по данным производителя *Nemoto* для датчика водорода *NP-AHS*. Точность аппроксимации математической модели термokatалитического датчика по концентрации водорода составила 0,37%, по тестирующей выборке – 0,41%.

Таблица 3. Погрешности моделирования полупроводникового датчика

Table 3. Errors in modeling a semiconductor sensor

C_{CO} , об. %	RH , (10-90%)		T , (268,15 K – 323 K)	
	σ , %	СКО, %	σ , %	СКО, %
Чистый воздух	0,59	0,42	–	–
0,003	16,01	5,51	29,02	8,21
0,01	16,05	5,31	29,01	3,71
0,03	8,02	4,72	10,02	3,18

Модернизированная модель оптического датчика была параметризована по данным производителя *Dynament* для датчика диоксида углерода *MSH-P-CO2/NC/TC*. Значение максимальной относительной погрешности по целевому газу (CO_2) не превысило 3,61 %.

Параметризация существующей линейной модели электрохимического датчика кислорода *I-01* проводилась по данным производителя *International Technology*.

Выбор перечня детектируемых газов (CO , H_2 , CO_2 , O_2) для апробации предложенной методики был сделан на основании анализа проблемы контроля параметров воздушных сред опасных производственных объектов [12-15]. Типы и модели датчиков конкретных производителей выбирались исходя из их ха-

рактеристик и применяемых к ним требований надежности, быстродействия, срока службы, стоимости и т.д. [16].

Результаты и их обсуждение

Библиотека среды *MatLAB* предлагает пользователю большой выбор нейронных сетей различных архитектур. В результате проведенных исследований и анализа работ, посвященных проблеме аппроксимации функции с помощью ИНС, была выбрана многослойная нейронная сеть прямого распространения (многослойный персептрон), показавшая наилучший результат в сравнении с сетями других архитектур (радиально-базисной, сеть Элмана, обобщенно-регрессионная нейронная сеть) [4,17-19].

Исследования различных структур многослойного персептрона проводи-

лись на обучающей и контрольной выборках, для исключения эффекта «переобучения» [20]. Для предотвращения эффекта переобучения объем обучающей выборки должен многократно превышать число определяемых коэффициентов модели. Применение разработанной методики генерации обучающих данных позволяет создавать выборки требуемого объема. Заметить эффект переобучения и своевременно остановить процесс позволяет оценка величины расхождения погрешностей по контрольной и обучающей выборкам.

На вход многослойного персептрона подавались нормированные сигналы (y) с n датчиков, входящих в состав системы:

$$\begin{bmatrix} y_{1CO} & y_{1H_2} & \dots & y_{1n} \\ y_{2CO} & y_{2H_2} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{mCO} & y_{mH_2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix},$$

где m – количество отсчетов по каждому контролируемому параметру. Объем обучающей выборки оценивался в соответствии с рекомендациями в [17]. Значения подаваемых на вход сигналов датчиков получали подстановкой различных сочетаний входных параметров (концентраций газов, значений давления, температуры, влажности), сгенерированных случайным образом, в математические модели датчиков. Рассчитанные по моделям значения сигналов нормировались в диапазоне 0-1. На выходе многослойного персептрона выдаются искомые концентрации газов:

$$\begin{bmatrix} c_{1CO} & c_{1H_2} & \dots & c_{1,n} \\ c_{2CO} & c_{2H_2} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{mCO} & c_{mH_2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix}.$$

Исходные значения концентраций газов и параметров воздушной среды задавались в соответствии с рабочими диапазонами датчиков.

Исследовались различные структуры многослойного персептрона: общая для всех типов датчиков, специализированная по каждому газу и комбинированная.

Общая ИНС преобразует сигналы трёх основных газовых датчиков (полупроводникового, термокаталитического и оптического типов) и трех дополнительных датчиков (температуры, давления и влажности) в отдельные значения концентраций трех газов (CO , CO_2 , H_2). В данном блоке обеспечивается подавление взаимной перекрёстной чувствительности датчиков CO и H_2 и влияния температуры, давления и влажности.

Специализированные сети представляют собой отдельные каналы по каждому из определяемых газов. Структура специализированной сети для определения монооксида углерода содержит пять входных нейронов (по числу основных и дополнительных датчиков) и один нейрон в выходном слое (по числу определяемых газов, CO), число нейронов в скрытом слое получено экспериментальным путем и равняется пяти. Аналогичную структуру имеет специа-

лизированная нейронная сеть для определения концентрации водорода. Специализированная сеть для диоксида углерода, вследствие высокой селективности оптического датчика, имеет упрощённую двухслойную конфигурацию, с тремя нейронами во входном и одним нейроном в выходном слое.

Комбинированная структура: сети для определения концентраций монооксида углерода и водорода были объединены в единый блок, концентрация диоксида углерода определялась ранее разработанной специализированной сетью. В табл. 4 представлены результаты поиска оптимальной структуры многослойного персептрона.

Таблица 4. Результаты исследования различных структур сети

Table 4. The results of the research on various network structures

Структура сети	Число коэффициентов	СКО, %		
		CO	H_2	CO_2
Общая ИНС	155	0,51	0,27	0,13
Специализированные ИНС	148	0,55	0,07	0,16
Комбинированная структура	128	0,57	0,13	0,15

Анализ полученных результатов показывает, что минимальное число весовых коэффициентов при сопоставимых значениях среднеквадратических отклонений позволяет обеспечить комбинированная структура сети. Такое решение принято в качестве оптимального. Комбинированная структура ИНС представлена на рис. 3.

Сеть состоит из трёх независимых блоков. В первом блоке (112 коэффициентов) на вход нейронной сети подаются сигналы, поступающие с пяти датчиков (5 нейронов во входном слое), а на выходе сети – концентрации двух газов (CO и H_2), в выходном слое два нейрона, в промежуточном 10. Структура второго блока по каналу диоксида углерода аналогична соответствующей специализированной сети. Количество ней-

ронов в скрытом слое подбиралось эмпирически, критерием выбора являлся компромисс между сложностью структуры сети и значениями, получаемых погрешностей.

Ниже представлена методика оценки эффективности применения метода нейронных сетей для повышения точности измерений концентраций газов за счет подавления влияющих факторов (перекрестная чувствительность, температура, влажность, давление). Тестирующие выборки генерировались с помощью математических моделей. Описание методики исследования представлено ниже:

– для конкретного значения концентрации целевого газа изменялось значение влияющего фактора в пределах допустимых границ;

– в математическую модель подставлялись соответствующие значения концентрации газа и воздействующего фактора, и рассчитывался сигнал датчика;

– полученное в п.2 значение сигнала датчика и заданное значение воздействующего фактора подавались на нейронную сеть, которая выдавала соответствующую концентрацию газа;

– вычислялась ошибка нейронной сети, для чего рассчитывалась погрешность расхождения, заданного и полу-

ченного нейронной сетью значений концентраций газа;

– определялась концентрация газа, соответствующая значению сигнала датчика, полученному в п.2 по реальным характеристикам датчика, представленным производителем;

– сравнивались относительные погрешности вычисления концентрации целевого газа с помощью метода ИНС и без него (по пунктам 3 и 5).

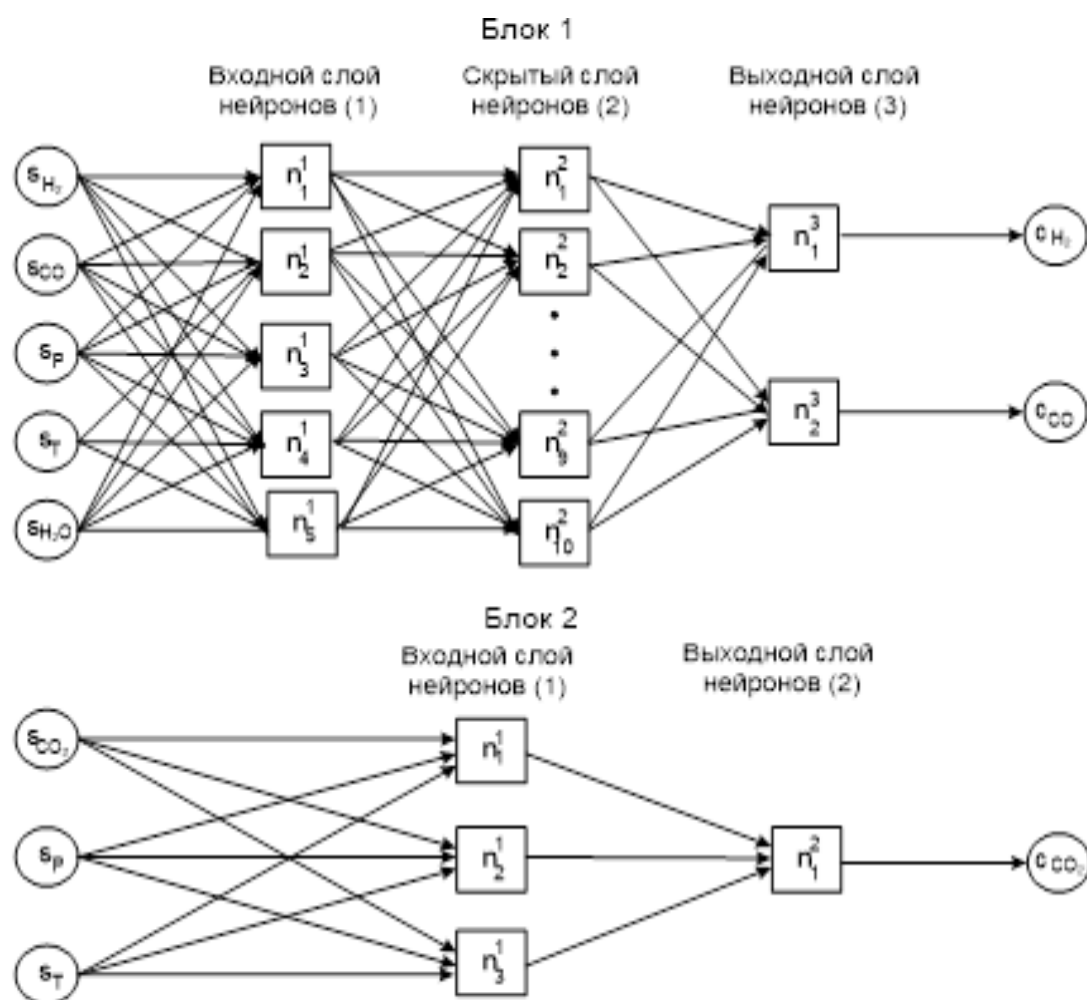


Рис.3. Комбинированная структура сети: s_{CO} , s_{H_2} , s_{CO_2} , s_{H_2O} , s_T , s_P – сигналы датчиков (CO , H_2 , CO_2 , T , P , RH); c_{CO} , c_{H_2} , c_{CO_2} – концентрации соответствующих газов

Fig. 3. Combined network structure: s_{CO} , s_{H_2} , s_{CO_2} , s_{H_2O} , s_T , s_P – sensor signals (CO , H_2 , CO_2 , T , P , RH); c_{CO} , c_{H_2} , c_{CO_2} – concentrations of the corresponding gases

На рисунке 4-5 в качестве примера представлены диаграммы, позволяющие сопоставить относительные погрешно-

сти, вызванные чувствительностью датчиков к мешающему газу, до и после применения нейронной сети.

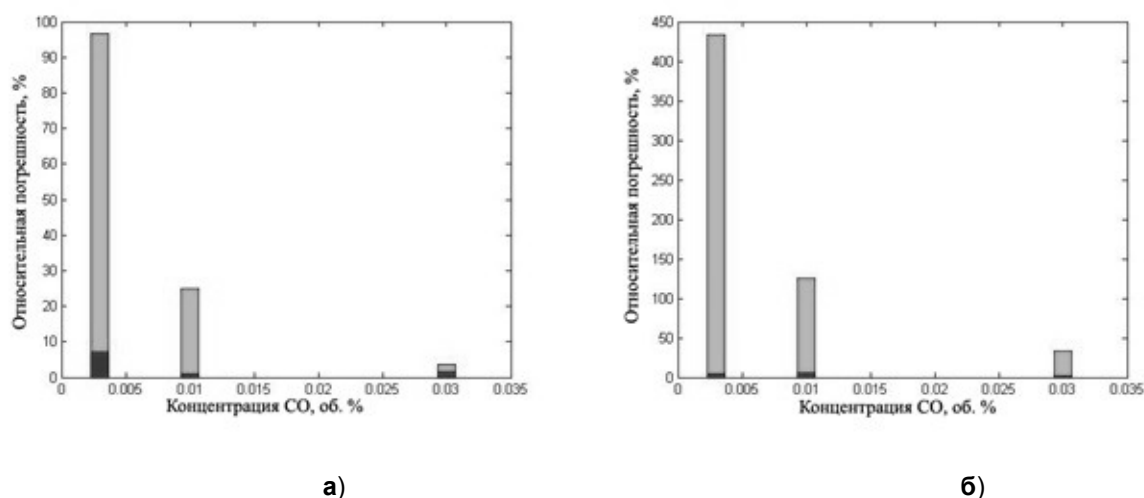


Рис. 4. Диаграммы относительных погрешностей измерения концентрации монооксида углерода в присутствии водорода, до и после применения метода ИНС: **а** – $C_{H_2} = 0,2\%$; **б** – $C_{H_2} = 2\%$ (погрешности ИНС обозначены черным цветом, погрешности без применения метода - серым цветом)

Fig. 4. Charts of relative errors in measuring the concentration of carbon monoxide in the presence of hydrogen, before and after the application of the ANN method: **a** – $C_{H_2} = 0,2\%$; **б** – $C_{H_2} = 2\%$ (errors of the ANN are indicated in black, errors without using the method are indicated in gray)

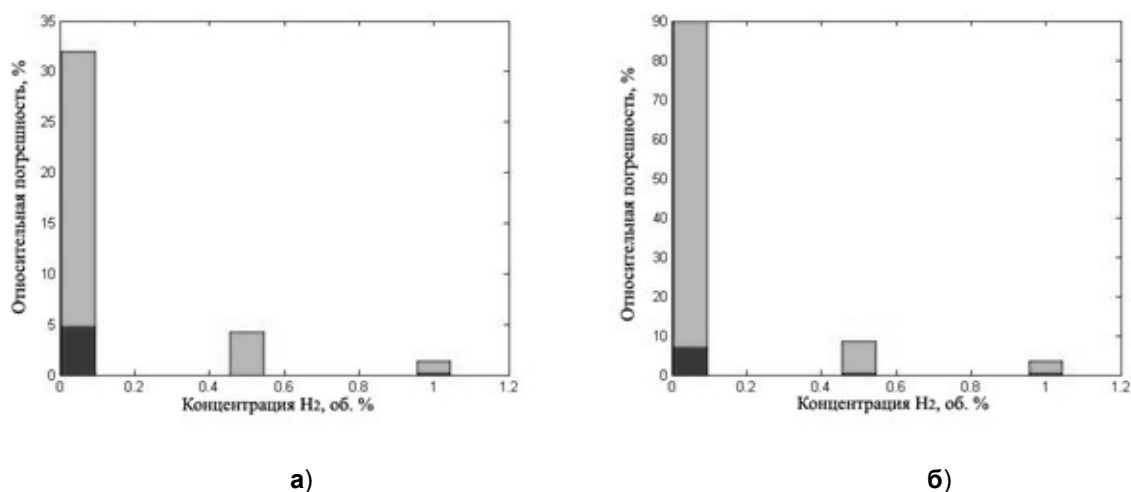


Рис. 5. Диаграммы относительных погрешностей измерения водорода в присутствии угарного газа, до и после применения метода ИНС: **а** – $C_{CO} = 0,01\%$; **б** – $C_{CO} = 0,1\%$ (погрешности ИНС обозначены черным цветом, погрешности без применения метода - серым цветом)

Fig. 5. Charts of relative measurement errors of hydrogen in the presence of carbon monoxide, before and after the application of the ANN method: **a** – $C_{CO} = 0,01\%$; **б** – $C_{CO} = 0,1\%$ (ANN errors are indicated in black, errors without using the method are gray)

Анализ диаграмм относительных погрешностей измерения концентрации монооксида углерода в присутствии водорода (рис. 4) показывает, что использование нейронной сети для снижения влияния мешающих газов на сигнал датчиков обладает высокой эффективностью. Для концентраций монооксида углерода до 0,01 об.% и концентрации мешающего газа водорода 0,2% погрешность снижается в 10 раз. С ростом концентрации мешающего газа (водорода) до 2% эффективность применения нейронных сетей возрастает, погрешность снижается в 20 раз при концентрациях угарного газа выше 0,01 об.%.

Анализ диаграмм относительных погрешностей измерения концентрации водорода в присутствии монооксида углерода (рис. 5) показывает, что использование метода нейронных сетей для подавления перекрестной чувствительности позволяет достичь наилучшего результата. При низких концентрациях анализируемого газа погрешность снижается в десятки раз. Для объемных концентраций водорода свыше 1% датчик практически не чувствителен к угарному газу в диапазоне концентраций монооксида углерода 0,003-0,1%. При низких концентрациях мешающего монооксида углерода (до 0,1 об.%) и концентрациях водорода свыше 1,0 об.% перекрестной чувствительностью датчика можно пренебречь.

Выводы

Проведенные в данной работе исследования позволяют судить об эффективности применения нейронной сети для обработки сигналов датчиков в газоанализаторах. Показано, что процесс разработки структуры сети, ее обучение и тестирование, требует большого числа обучающих данных. Получение их экспериментальным путем делает применение метода нецелесообразным.

Разработанная методика генерации обучающих данных с помощью математических моделей сенсоров позволяет автоматизировать процесс, снизить стоимость работ и их трудоемкость. Предложенный метод позволяет генерировать данные случайно в требуемом объеме, что дает возможность не только обучать и тестировать ИНС, но и контролировать процесс переобучения на отдельной выборке.

Значения погрешностей, полученные в результате оценки эффективности применения нейронных сетей для подавления влияния перекрестной чувствительности, демонстрируют высокий потенциал применения ИНС для обработки информации в многокомпонентных газоанализаторах. При низких концентрациях основного газа и высоких концентрациях мешающего газа погрешности измерений снижаются в десятки раз.

Список литературы

1. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring / F. George., L. M. Cavanagh, A. Afonja, R. Binions // *Sensors*. 2010. P. 5469-5502
2. Measure of carbon dioxide using a gas sensor of a semiconductor type based on tin dioxide (SnO_2) / H. Abderrahim, M. Berrebia, A. Hamou, H. Kherief, Y. Zanon, K. Zenata // *J. Mater. Environ. Sci.* 2011. 2 (2). P. 94-103
3. Бельшева Т.В., Боговцева Л.П., Гутман Э.Е. Применение металлооксидных полупроводниковых гетеросистем для газового анализа // *International Scientific Journal: for Alternative Energy and Ecology*. 2004. №2. С.67-66.
4. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О., Бондарь О. Г. Устройство обработки сигналов многокомпонентного газо- анализатора // *Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика*. 2011. № 12. С. 43-48 .
5. Брежнева Е.О., Бондарь О.Г. Газоанализатор монооксида углерода и водорода // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 2-3. С. 67-70.
6. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа З.До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 4-2 (43). С. 44-50.
7. Дашковский А.А., Примиский В.Ф. Математическое моделирование многокомпонентных газоаналитических измерений и анализ погрешностей // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2005. № 6/2 (18). С. 108-111.
8. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О. Моделирование газочувствительных датчиков // *Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика-2011: материалы 2-ой Международной науч.-техн. конф. Курск, 2011. С. 53-59.*
9. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor // *Measurement Techniques*. August, 2018. Vol.61. N 5. P.514-519.
10. Electro-thermal modeling of a microbridge gas sensor / R. P. Manginell, J. H. Smith, A. J. Ricco, R. C. Hughes, D. J. Moreno // *Sandia National Laboratories, Albuguerge, NM87185-1080*. 1997. P. 360-371
11. Дрейзин В. Э., Брежнева Е.О., Бондарь О. Г. Моделирование каталитического датчика водорода // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 5(38). Ч. 1. С. 69-76.
12. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
13. Щеглов П.П., Шароварников А.Ф. Токсичные продукты термического разложения и горения полимерных материалов при пожаре. М.: ВПНТШ МВД России, 1992. 80 с.
14. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

15. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О. Сравнительный анализ характеристик промышленных газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 68-78.
16. Сазонов С.Ю., Титенко Е.А., Ханис Н.А. Подход к прогнозированию возникновения пожароопасной ситуации в дата-центре на основе нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение, 2015. № 4 (17). С. 8-14.
17. Swingler K. Applying neural networks: A practical guide. London: Academic Press, 1996. 345 p.
18. Foresee F.D., Hagan M.T. Gaus-Newton approximation to Bayesian regularization. // Proceedings of the 1997 International Joint Conference on Neural Networks. 1997. P. 1930-1935.
19. Дрейзин В.Э., Гримов А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2-3. С. 223-228.
20. 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>.

References

1. George F., Cavanagh L. M., Afonja A., Binions R. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. *Sensors*, 2010, pp. 5469-5502.
2. Abderrahim H., Berrebia M., Hamou A., Kherief H., Zanoun Y., Zenata K. Measure of carbon dioxide using a gas sensor of a semiconductor type based on tin dioxide (SnO₂). *J. Mater. Environ. Sci.*, 2011, 2 (2), pp. 94-103.
3. Belysheva T.V., Bogovtseva L.P., Gutman E.E. Primenenie metalloksidnykh poluprovodnikovykh geterosistem dlya gazovogo analiza [The use of metal oxide semiconductor heterosystems for gas analysis]. *International Scientific Journal: for Alternative Energy and Ecology*, 2004, no. 2, pp.67-66 (In Russ.).
4. Dreizin V., Brezhneva E. O., Bondar O. G. Ustroistvo obrabotki signalov mnogokomponentnogo gazo- analizatora [The signal processing device of a multicomponent gas analyzer]. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and Systems. Management, control, diagnostics*, 2011, no. 12, pp. 43-48 (In Russ.).
5. Brezhnev E.O., Bondar O.G. Gazoanalizator monooksida ugleroda i vodoroda [Gas analyzer of carbon monoxide and hydrogen]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 2-3, pp. 67-70 (In Russ.).

6. Tomakova R.A., Filist S.A., Yaa Z. Do. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal Network Models for Classification of Biomedical Data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 44-50 (In Russ.).

7. Dashkovsky A.A., Primsky V.F. Matematicheskoe modelirovanie mnogokomponentnykh gazoanaliticheskikh izmerenii i analiz pogreshnostei [Mathematical modeling of multicomponent gas analytical measurements and error analysis]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = East European Journal of Advanced Technology*, 2005, no. 6/2 (18), pp. 108-111 (In Russ.).

8. Dreizin V.E., Brezhnev E. O. [Modeling of gas-sensitive sensors]. *Materialy 2-oi Mezhdunarodnoi nauch.-tekhn. konf. "Informatsionno-izmeritel'nye diagnosticheskie i upravlyayushchie sistemy. Diagnostika-2011"* [Materials of the 2nd International scientific and technical. conf. "Information-measuring diagnostic and control systems. Diagnostics-2011"]. Kursk, 2011, pp. 53-59 (In Russ.).

9. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor. *Measurement Techniques*, August, 2018, vol.61, no. 5, pp.514-519.

10. Manginell R. P., Smith J. H., Ricco A. J., Hughes R. C., Moreno D. J. P. Moreno Electro-thermal modeling of a microbridge gas sensor. *Sandia National Laboratories, Albuquerque*, NM87185-1080, 1997, pp. 360-371.

11. Dreizin V. E., Brezhnev E.O., Bondar O. G. Modelirovanie kataliticheskogo datchika vodoroda [Modeling a catalytic hydrogen sensor]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5 (38), pt.1, pp. 69-76 (In Russ.).

12. Drazdale D. *Vvedenie v dinamiku pozharov* [Introduction to Fire Dynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 424 p. (In Russ.).

13. Scheglov P.P., Sharovarnikov A.F. *Toksichnye produkty termicheskogo razlozheniya i gorennya polimernykh materialov pri pozhare* [Toxic products of thermal decomposition and combustion of polymeric materials in case of fire]. Moscow, 1992, 80 p. (In Russ.).

14. Koshmarov Yu. A. *Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Prediction of hazardous factors of fire in the room]. Moscow, 2000, 118 p. (In Russ.).

15. Dreizin V.E., Brezhneva E.O. Sravnitel'nyi analiz kharakteristik promyshlennykh gazochuvstvitel'nykh datchikov [Comparative analysis of the characteristics of industrial gas-sensitive sensors]. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*, 2011, no 3, pp. 68-78 (In Russ.).

16. Sazonov S.Yu., Titenko E.A., Hanis N.A. Podkhod k prognozirovaniyu vznikeniya pozharoopasnoi situatsii v data-tsentre na osnove neironnykh setei [Approach to prediction of fire management in the data center based on neural networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika*,

17. Swingler K. Applying neural networks: A practical guide. London, Academic Press, 1996, 345 p.

18. Foresee F.D., Hagan M.T. Gaus-Newton approximation to Bayesian regularization. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 1997, pp. 1930-1935.

19. Dreyzin V. E., Grimov A. A. Izmeritel'nyi blok dlya neitronnogo spektrometra real'nogo vremeni s vychislitel'nym vosstanovleniem energeticheskikh spektrov s pomoshch'yu neironnykh setei [A Measuring unit for a real-time neutron spectrometer with computational reconstruction of energy spectra using neural networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 2-3, pp. 223-228 (In Russ.).

20. Mikhailchenko 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>.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

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

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

Чернышов Ростислав Евгеньевич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rostyslav231@gmail.com

Rostislav E. Chernyshov, Student, Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rostyslav231@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>

Восстановление порядка следования информационных пакетов на основе анализа хеш-последовательностей

М.О. Таныгин¹ ✉

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Резюме

Цель исследования. В настоящее время для контроля целостности и аутентичности данных, передаваемых по открытым каналам связи, используются различные технологии и методы. Одним из таковых является технология передачи последовательностей информационных пакетов, связанных друг с другом в цепочки по определённым криптографическим алгоритмам. Аналогичные подходы используются в широко известной технологии блокчейн и ориентированы на большие объёмы передаваемой и защищаемой информации и большие размеры дополнительных служебных полей данных. Целью настоящей статьи является исследование характеристик систем, передачи информационных пакетов небольшого, в сравнении с традиционными размерами кадров стека протоколов TCP/IP, размера, в которых нарушенный порядок следования пакетов восстанавливается с помощью метода цепочек, за счёт анализа хеш-последовательностей, имеющихся в составе каждого такого пакета.

Методы. В данной статье использовались имитационное моделирование, метод системного анализа, метод систематизации и ранжирования полученных результатов.

Результаты. Показано, что существенное влияние на снижение вероятности ошибочного восстановления порядка следования информационных пакетов оказывает повышение размера дополнительного поля с хешем предыдущего сообщения с 4 до 6 битов. Дальнейшее увеличение длины поля хеша снижает вероятность ошибки лишь на 2 – 5 % на каждый дополнительный бит поля хеша при любой длине восстанавливаемой цепочки. Показано, что коэффициент использования канала связи – отношение объёма полезной цепочки пакетов к объёму всей информации, переданной по каналу связи – максимален при длине поля хеша 6 во всём диапазоне размеров поля информационной части пакета данных.

Заключение. В работе показано, что метод цепочек применим для восстановления исходной последовательности передаваемых от источника в приёмник информационных пакетов в системах, где сохранение очередности следования пакетов не гарантируется. Полученные значения параметров работы системы передачи позволяют обеспечить приемлемую надёжность передачи данных при минимальном объёме дополнительной служебной информации и достичь информационной избыточности меньше, чем у аналогов на 10–15%.

Ключевые слова: передача информации; метод цепочек; хеш; имитационное моделирование; вероятность ошибки передачи данных.

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

Для цитирования: Таныгин М.О. Восстановление порядка следования информационных пакетов на основе анализа хеш-последовательностей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 175-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>.

Поступила в редакцию 28.11.2019

Подписана в печать 14.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Restoring the Order of Information Packets Based on Hash Sequence Analysis

Maxim O. Tanygin¹ ✉

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research. Currently, various technologies and methods are used to control the integrity and authenticity of data transmitted through open communication channels. One of them is the technology for transmitting sequences of information packets connected to each other in chains using certain cryptographic algorithms. Similar approaches are used in the well-known blockchain technology and are focused on large volumes of transmitted and protected information and large sizes of additional service information fields. The purpose of this article is to study the characteristics of systems, transmission of small information packets in comparison with traditional size frames of TCP/IP stack, in which the broken packet sequence order is restored using the chain method, by analyzing hash sequences available in each of such packets.

Methods. In this article, simulation modeling, system analysis method, method of systematization and ranking of the obtained results are used.

Results. It is shown that increasing the size of the additional field with the hash of the previous message from 4 to 6 bits has a significant effect on reducing the probability of erroneous restore of the order of information packets. Further increasing the length of the hash field reduces the probability of error by only 2 to 5 % for each additional bit of the hash field for any length of the chain being restored. It is shown that the coefficient of the usage of the communication channel (the ratio of useful chain of packets to the volume of information transmitted through the communication channel) is maximum when the length of the hash field is 6 in the whole range of sizes of the field information part of the data packet.

Conclusion. The paper shows that the chain method is applicable for restoring the original sequence of information packets transmitted from the source to the receiver in systems where the preservation of the sequence of packets is not guaranteed. The obtained values of the transmission system parameters allow us to ensure acceptable reliability of data transmission with a minimum amount of additional service information, and achieve information redundancy less than that in similar ones by 10-15.

Keywords: information transmission; chain method; hash, simulation modelling, probability of data transferring error.

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

For citation: Tanygin M. O. Restoring the Order of Information Packets Based on Hash Sequence Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 175-188 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-175-188>.

Received 28.11.2019

Accepted 14.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Технология блок-чейн, то есть объединение в структурированную последовательность информации, представленной в форме отдельных блоков за счёт использования функций криптографического хеширования, приобрела в последнее время широкую известность. С помощью децентрализованного и распределенного управления данными существует возможность определения доверия на основе встроенного механизма криптографии и консенсуса, обеспечивая тем самым безопасность, анонимность и целостность данных. В то же время, развитие данной технологии подтолкнуло исследования в смежных направлениях информатики и теории связи, обеспечивая решение ряда проблем информационной безопасности [1]. Например, подходы, используемые в технологии блок-чейн, схожи с подходами, используемыми для аутентификации удалённых субъектов информационного обмена.

Предметом настоящей статьи являются системы, состоящие из источника и приёмника информационных блоков небольшого, в сравнении с традиционными размерами кадров стека протоколов TCP/IP, размера. Примером такой системы может быть программно-аппаратная система, в которой основные функции выполняются в аппаратном средстве, а программное обеспечение осуществляет управление его работой и другие сервисные операции [2 –

4]. Согласно правилам, реализованным в протоколе PCI Express, упорядочивание поступающих в приёмник пакетов не гарантируется для сохранения высокой скорости передачи данных [5]. В результате, при взаимодействии двух конечных устройств или программного обеспечения и устройства между собой возникает потребность в потоковой высокоскоростной передаче данных при соблюдении последовательности передаваемых данных. Это, в свою очередь, требует при передаче пакетов произвольной длины по стандартному PCIe, использовать алгоритмы, позволяющие исключать изменения порядка следования пакетов, один из которых рассмотрен в [6]. В настоящей работе мы исследуем свойства подобных алгоритмов, снижающих вероятности ошибочной передачи данных за счёт подходов, аналогичных подходам, используемым в блок-чейн.

Материалы и методы

Для рассматриваемой системы были определены следующие принципы работы алгоритма опознания поступающих информационных пакетов.

В качестве таких условий выступают:

- на источнике генерируются информационные пакеты и передаются по каналу связи в приемник;
- при передаче по каналу пакеты могут быть перемешаны, в результате чего порядок их поступления в приёмник будет отличаться от порядка их выдачи источником;

– проблема сохранения целостности информационных пакетов в настоящей работе не рассматривается.

Исходный порядок следования пакетов в приёмнике восстанавливается с помощью метода цепочек [7 – 9], заключающегося в том, что в информационный пакет добавляется сформированная каким-либо образом идентификационная информация, в нашем случае хеш-последовательность, сформированная из данных предыдущего пакета

(рис. 1). Эта информация позволяет в ходе проверки точно определить, во-первых, принадлежность конкретного пакета последовательности и, во-вторых, место пакета в последовательности [10, 11].

Хеш поступившего пакета сравнивается со всеми хешами, сформированными пакетами, полученных приёмником к настоящему моменту времени, и, в случае совпадения блок добавляется в последовательность на требуемую позицию (рис. 2).



Рис. 1. Структура пакета

Fig. 1. The packet structure

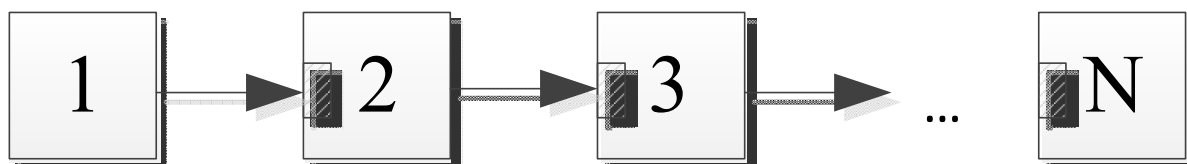


Рис. 2. Исходный порядок пакетов

Fig. 2. The original order of the packets

Условие записи пакета на позицию i в цепочке выглядит следующим образом

$$\begin{cases} S_{i+1}^{hash} = F_{hash}(S_i^{inf}). \\ S_i^{hash} = F_{hash}(S_{i-1}^{inf}), i = \overline{1 \dots N}, \end{cases} \quad (1)$$

где $S_i = \{S_i^{inf} | S_i^{hash}\}$ – пакет, записываемый на позицию i , состоящий из информационной части S_i^{inf} и хеша S_i^{hash} ;

F_{hash} – хеш-функция;

S_{i-1}^{inf} – информационная часть пакета, которая будет записана на позицию $i-1$;

S_{i+1}^{hash} – хеш пакета, который будет записан на позицию $i+1$;

N – размер цепочки пакетов.

Как было сказано выше, при передаче пакетов порядок их следования может быть изменён. Поэтому проверка условия (1) должна происходить в приёмнике при каждом новом поступив-

шем пакете, и вся цепочка будет перестраиваться.

В процессе проверки хешей в приёмнике могут возникнуть коллизии. Коллизия – это ситуация, в которой, при правильном выполнении алгоритма хеширования, у двух или более различных пакетов получается один и тот же

хеш [12]. Схематично данная ситуация представлена на рис. 3. В случае возникновения коллизии задача определения позиции пакета в цепочке не может быть разрешена исходя из имеющихся данных и требуется повторная передача всей цепочки.

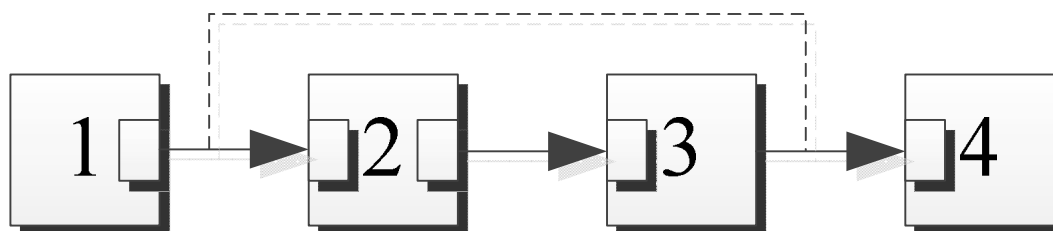


Рис. 3. Пример коллизии

Fig. 3. A collision example

Задача настоящего исследования состоит в определении вероятности возникновения подобных коллизий в системах, где на размер пакета накладываются серьезные ограничения. Причиной возникновения подобных ограничений является невысокая скорость передачи и требуемое высокое время отклика, что характерно, например, для протоколов, по которым работают устройства интернета вещей [13]. В подобных протоколах размер пакета может составлять несколько байтов [14]. Соответственно, размер поля хеша не должен превышать несколько битов.

В качестве основной характеристики, на которую влияет выбор метода восстановления порядка пакетов, является информационная избыточность – необходимый для организации сеанса связи объем информации, который ана-

лизируется приёмником для принятия решения о номере конкретного информационного пакета в последовательности. Это могут быть как передаваемые между источником и приёмником сеансовые параметры связи, криптографические ключи, идентификаторы, адреса, так и информация, содержащаяся в повторно посылаемых данных. Необходимость в таких повторных отправках возникает в результате ошибок и коллизий. Для нашего метода именно повторно пересылаемые данные будут вносить главный вклад в информационную избыточность, так как для описания процесса передачи: количества пакетов в цепочке, длины служебных полей и пр. достаточно буквально нескольких битов.

Исследования численных характеристик системы построения цепочек

пакетов на основе хешей представляет собой достаточно сложную задачу, при решении которой необходимо сделать множество допущений, снижающих достоверность полученного результата [15]. Поэтому было принято решение использовать имитационное моделирование процесса передачи и анализа поступающих пакетов [16]. Модель, реализованная в среде Mathcad, формировала случайным образом последовательность информационных пакетов, дополняла каждый пакет хешем требуемой длины, выполняла их перемешивание (изменение порядка поступления в приёмник) и последующее восстановление исходной последовательности [17]. В случае возникновения коллизии и невозможности выполнить задачу построения последовательности формировалось соответствующее сообщение.

Для определения математического ожидания вероятности возникновения коллизии эксперимент для каждого тестового набора входных данных (длина хеша, тип хеш-функции) проводился 10^4 раз. При таком количестве опытов величина стандартной ошибки для полученного значения математического ожидания вероятности коллизии имеет порядок 10^{-3} [18].

Результаты и их обсуждение

В результате имитационного моделирования установлено, что на среднюю вероятность возникновения коллизии тип хеш-функции не влияет, влияет лишь длина поля хеша. Зависимость вероятности возникновения коллизии P_{coll} от длины поля хеша L_{hash} приведена на рис. 4.



Рис. 4. Зависимость вероятности возникновения коллизии P_{coll} от длины поля хеша L_{hash} при длине цепочки $l_{\text{cain}} = 15$

Fig. 4. Dependence of the probability of a collision P_{coll} on hash size L_{hash} with chain length $l_{\text{cain}} = 15$

График зависимости вероятности коллизий построен для значения длины цепочки информационных пакетов $l_{\text{cain}} = 15$. График зависимости вероятности коллизии от длины поля хеша L_{hash} и длины цепочки l_{cain} показан на рис. 5. Для большей наглядности ось l_{cain} приведена в нелинейном масштабе. Анализ графиков на рис. 4 и 5 показывает, что длина поля хеша оказывает значительное влияние на вероятность коллизии лишь до значения 6. Дальнейший рост длины поля хеша снижает вероятность в пределах 1% на каждый дополнительный бит длины. Также незначительное

влияние оказывает длина восстанавливаемой приёмником цепочки: рост на 10% при росте длины цепочки с 15 до 60 информационных пакетов. Следует отметить, что подобный рост вероятности коллизии наблюдается лишь при небольших длинах поля хеша L_{hash} . При больших значениях L_{hash} рост вероятности не превышает 5%. В связи с тем, что длина цепочки оказывает несущественное влияние на вероятность коллизии по сравнению с длиной поля хеша, дальнейшие данные экспериментов приведены для $l_{\text{cain}} = 15$.

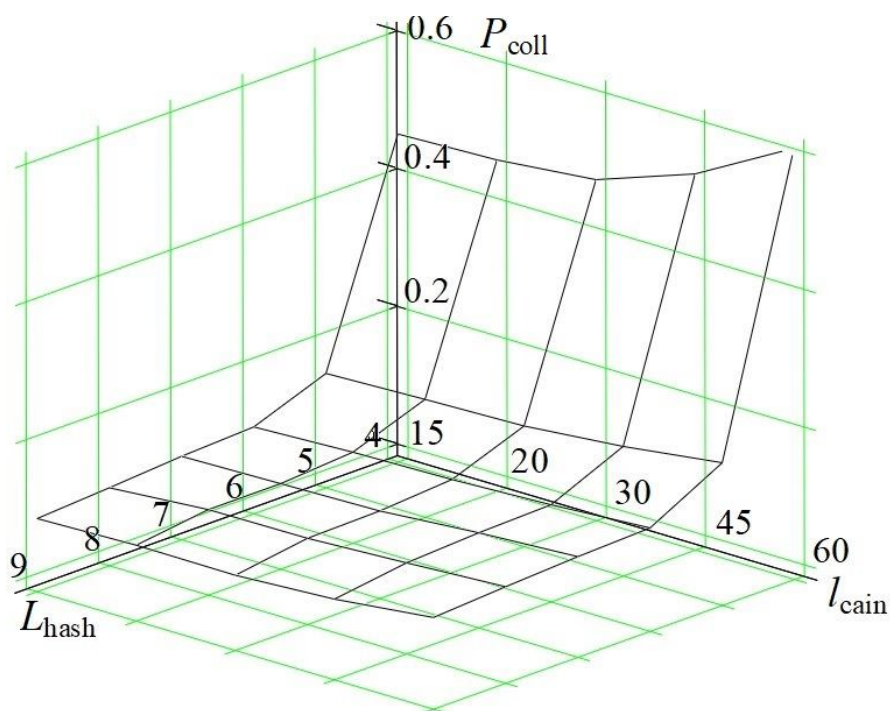


Рис. 5. Зависимость вероятности возникновения коллизии P_{coll} от длины поля хеша L_{hash} и длины цепочки l_{cain}

Fig. 5. Dependence of the probability of a collision P_{coll} on hash size L_{hash} and chain length l_{cain}

Переходя к анализу целевой характеристики эффективности – информационной избыточности, введём специальную меру – коэффициент использования канала K [16]. Данный коэффици-

ент показывает отношение объёма полезной цепочки пакетов к объёму всей информации, переданной по каналу связи. При расчете данного параметра мы учитывали, что коллизия требует

повторной передачи данных, а следовательно, данный коэффициент должен находиться в прямой зависимости от вероятности успешной передачи всей цепочки пакетов [19]. Итоговая формула для коэффициента использования канала имеет вид:

$$K = \frac{L_{\text{inf}} \cdot (1 - P_{\text{coll}})}{L_{\text{inf}} + L_{\text{hash}}}, \quad (2)$$

где L_{hash} — длина поля хеша пакета (см. рис. 1),

L_{inf} — длина информационного поля пакета;

P_{coll} — вероятность коллизии при данной длине поля хеша пакета.

Анализ графика коэффициента использования канала (рис. 6) показывает очевидную тенденцию: с ростом длины информационной части коэффициент использования канала растёт при любом значении длины хеша. В то же время ярко выраженный максимум данного коэффициента наблюдается в районе $L_{\text{hash}} = 6$, где график образует своеобразный «гребень». Трактовать это можно следующим образом. При значениях длины поля хеша $L_{\text{hash}} < 6$, коэффициент использования канала уменьшается за счёт высокой вероятности коллизий, которые требуют повторения сеанса передачи всей цепочки. При значениях длины поля хеша $L_{\text{hash}} > 6$, коэффициент использования канала снижается за счёт роста длины поля хеша при незначительном (см. рис. 4) снижении вероятности коллизии.

Если сравнивать описываемый в статье метод восстановления последовательностей сообщений с известными, то в качестве аналогичных можно упомянуть метод контроля целостности и аутентичности, описанный в работе [20]. Отсутствие ошибок передачи доставки для каждого пакета определяется по результатам операций в полях Галуа над двумя матрицами: одной, проверочной, хранящейся в приёмнике и задающей, на основе которой формируется вектор пакетов небольшого размера (сопоставимого с размерами пакетов, рассмотренных в настоящей работе). Сами матрицы дополняются псевдослучайными числами для повышения защищённости передаваемых данных. Для обеспечения секретности по структуре матрицы, полученной в результате операций над вышеуказанными двумя матрицами, принимается решение о правильности или неправильности доставки конкретного блока и о корректности его позиционирования в итоговом собранном из отдельных блоков сообщении. Метод позволяет безошибочно передавать фрагментированную на отдельные пакеты информацию за счёт универсальных характеристики, получаемых в результате матричных преобразований над проверочной матрицей и вектором поступающих слов. Преимуществом предлагаемого метода является отсутствие необходимости хранить в приёмнике большую по объёму матрицу чисел, необходимую для проверки поступающих пакетов.

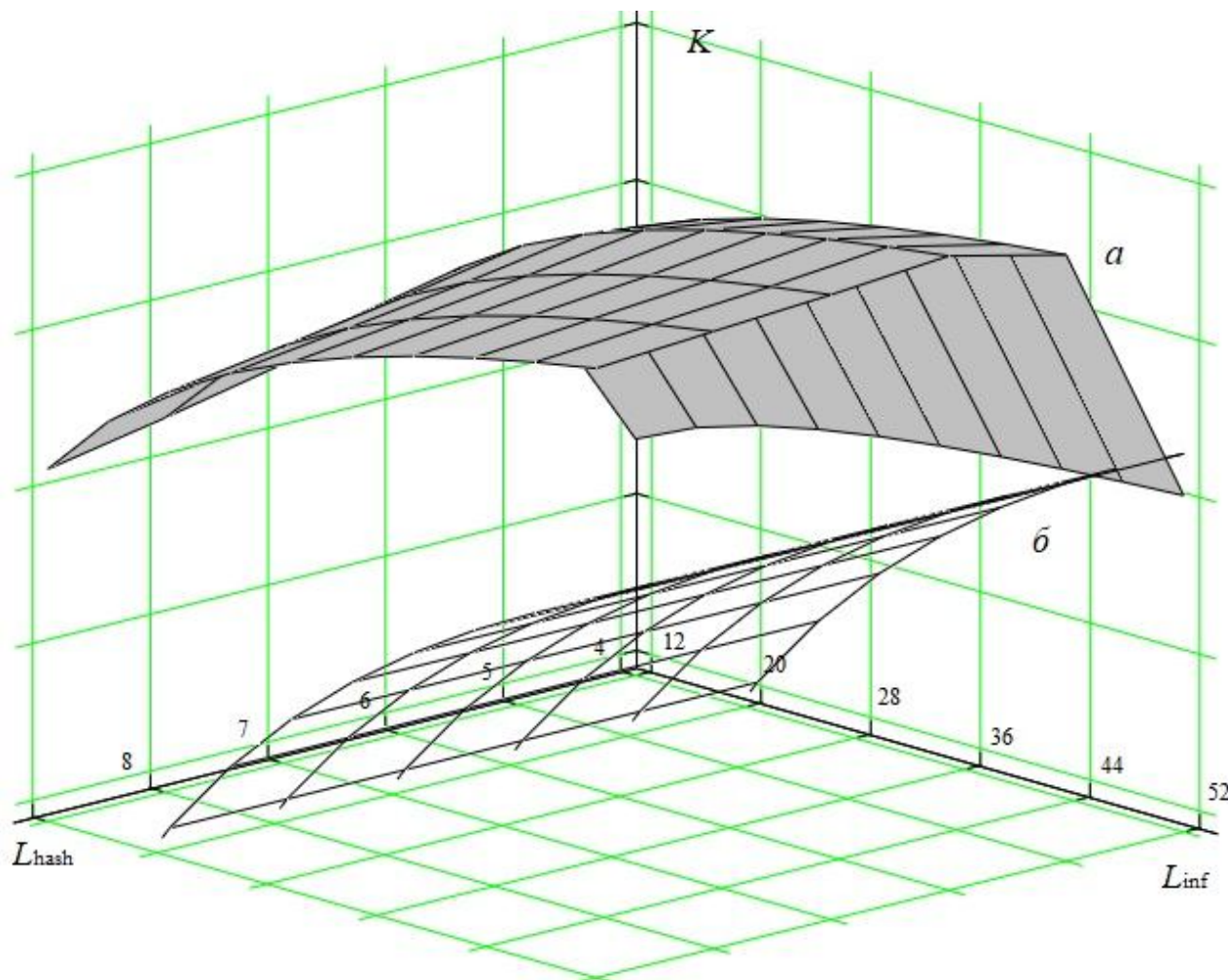


Рис. 6. Зависимость коэффициента K использования канала от длины дополнительных полей L_{hash} и длины информационного поля L_{inf} : **а** – метод на основе хешей; **б** – метод динамически конфигурируемых маршрутов доставки

Fig. 6. Dependence of the channel consumption coefficient K on additional field size L_{hash} and information field size L_{inf} : **a** – the hash-based method; **b** – the method for dynamically configured delivery routes

Сам размер такой матрицы, превышающий в несколько раз размер вектора данных, и необходимость её передачи из источника в приёмник позволяет достичь указанного в настоящей работе коэффициента использования канала в 80% лишь при использовании такой матрицы для контроля передачи пакетов в более чем ста последовательных сеансах передачи. Тогда как описанный метод позволяет использовать неболь-

шой идентификатор источника для формирования хешей пакетов, размером, не превышающим один блок информации, что позволяет менять его практически каждый цикл передачи цепочки пакетов, что в целом делает подобную передачу более защищённой.

Другим методом, с которым можно сравнить описываемый, является метод контроля правильности поступления информационных пакетов в приёмник

за счёт контроля динамически конфигурируемых маршрутов доставки каждого из них [21]. Его особенностью является большой объём дополнительной служебной информации, доходящий до 30% от общего объёма передаваемой информации при размере контролируемых пакетов в несколько десятков байтов. На рис. 6 численные характеристики этого метода приведены для сравне-

ния с характеристиками обсуждаемых. Обсуждаемый в настоящей статье метод, в сравнении с ним, обеспечивает меньшую информационную избыточность (до 15-25%) при сравнительно меньшем размере пакетов, формирующих цепочку.

Результат сравнения обсуждаемого в настоящей статье метода с аналогами можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1. Сравнение методов восстановления последовательности сообщений

Table 1. Comparison of methods for restoring the messages sequence

Методы восстановления последовательности	Критерии		
	Отношение объёма параметров связи к объёму данных, передаваемых за один сеанс	Зависимость от условий канала связи	Информационная избыточность
Метод на основе хешей	<5%	отсутствует	15-25%
Метод на основе матричных преобразований	до 400%	отсутствует	-
Метод на основе динамически конфигурируемых маршрутов доставки	-	определяет объём дополнительных описателей маршрута	30%

Анализ таблицы позволяет сказать, что метод на основе хешей позволяет снизить объём дополнительных данных, передаваемых по каналам связи для обеспечения восстановления порядка следования информационных пакетов, при этом сохраняя возможность оперативного изменения отдельных сеансовых параметров передачи.

Выводы

Проведённые исследования позволяют сделать ряд выводов. Метод цепочек, заключающийся в формировании на основе криптографических преобразований цепочек связанных друг с другом в определённом порядке информационных пакетов, может быть применим для восстановления исходной последовательности пакетов, передаваемых от источника в приёмник, в системах, где сохранение очерёдности следования пакетов не гарантируется. Его использование целесообразно даже в системах, в которых размер передаваемого пакета может быть всего несколь-

чек, заключающийся в формировании на основе криптографических преобразований цепочек связанных друг с другом в определённом порядке информационных пакетов, может быть применим для восстановления исходной последовательности пакетов, передаваемых от источника в приёмник, в системах, где сохранение очерёдности следования пакетов не гарантируется. Его использование целесообразно даже в системах, в которых размер передаваемого пакета может быть всего несколь-

ко байтов. Основным недостатком метода цепочек является возникновение коллизий – ситуаций совпадения значений в дополнительных полях информационных пакетов. Аналитический расчет вероятности возникновения подобных коллизий достаточно сложен и сопряжён с многочисленными упрощениями и пренебрежениями. Поэтому имитационное моделирование является целесообразным способом определения численных характеристик системы передачи пакетов с контролем очередности следования на основе метода цепочек.

Полученные в результате имитационного моделирования характеристики подобных систем позволяют определить целесообразные значения длины дополнительного поля хеша в информационном пакете, которое для систем с размером пакета в 4 – 7 байтов со-

ставляет 6 битов. При этом объём полезной информации достигает 80% от общего объёма данных, передаваемых по каналу связи, с учётом необходимости повторной передачи всей цепочки пакетов в случае возникновения ошибки, что больше, чем у известных аналогов. Данный метод позволяет использовать сеансовые параметры для формирования хеш-последовательностей, практически не повышая информационную избыточность, что делает его использование предпочтительным по сравнению с аналогами. Установлено, что путём ограничения длины цепочки пакетов, связанных с друг другом на основе хешей, можно незначительно, в пределах 10%, снизить вероятность возникновения ошибок восстановления исходной последовательности в приёмнике.

Список литературы

1. Kanter W., Kinzel E., Kanter Secure exchange of information by synchronization of neural networks // *Europhysics Letters*. 2002. Vol. 57. Is. 1, P. 141-147.
2. Глазков А. С., Типикин А. П. Метод и функциональная организация контроля обращений и закрытия доступа к секторам файлов при хищении накопителя информации // *Информационные технологии*. 2010. № 5. С. 25–30.
3. Типикин А.П., Глазков А.С., Муратов С.А. Организация пользовательской системы защиты информации, хранящейся на жестком магнитном диске // *Телекоммуникации*. 2009. №10. С.33 – 37.
4. Таныгин М. О., Типикин А. П. Архитектура системы аппаратного ограничения доступа к информации на жестком диске ЭВМ // *Телекоммуникации*. 2006. №3. С.44 – 46.
5. PCI Special Interest Group. PCI Express® Base Specification Revision 3.0. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.694.7081&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 15.10.2019)

6. Способ обмена данными между контроллерами защиты информации по протоколу PCI-Express / В.П. Добрица, Е.В. Непочатых, Р.С. Слободин, Е.В. Талдыкин, М. О. Таныгин, А. П. Типикин // Телекоммуникации. 2019. №8. С.21 – 26.
7. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Confidentiality // Cryptologia. 2010. № 34(2). P. 163 – 175.
8. Bellare M., Canetti R., Krawczyk H. Keying hash functions for message authentication // Advances in Cryptology. 1996. Vol. 1. 109 of Lecture Notes in Computer Science. P. 1 – 15.
9. Karri R., Rajendran J., Rosenfeld K. Trustworthy hardware: Identifying and classifying hardware Trojans. Moscow, Tehranipoor – Computer (Long. Beach. Calif). 2016. №10. С. 39 – 46.
10. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions // J. Cryptol. 2015. Vol. 18. №2. P. 111–131.
11. Kruti S., Gambhava B. New Approach of Data Encryption Standard Algorithm // Int. J. Soft Comput. Eng. 2015. №1. 369 p.
12. Bellare M., Kilian J., Rogaway P. The security of the cipher block chaining message authentication code // JCSS. 1994. Vol. 3. № 3. P. 341–358.
13. Лоднева О.Н., Ромасевич Е.П. Анализ трафика устройств интернета вещей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 1. С. 149 – 169.
14. Зайцев В., Соколов Н. Особенности мультисервисного трафика с учетом сообщений, создаваемых устройствами IoT // Первая миля. 2017. № 4. С. 44 – 47.
15. Установление доверительного канала обмена данными между источником и приёмником информации с помощью модифицированного метода одноразовых паролей / М.О. Таныгин, Х.Я. Алшаиа, 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. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М., 2015. С. 62-98.
17. Hellerman H. Digital Computer System Principles // McGraw-Hill, 1967. P. 134-142.
18. Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я. Обработка результатов технических измерений. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 72 с.
19. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Первые глобальные сети // Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 5-е изд. СПб.: Питер, 2016.
20. Panagiotis Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. 2003. №1. P. 193–209.
21. Ben Othman S., Alzaid H., Trad A., Youssef H. An efficient secure data aggregation scheme for wireless sensor networks // IISA 2013, doi:10.1109/iisa.2013.6623701

References

1. Kanter W., Kinzel E., Kanter Secure exchange of information by synchronization of neural networks. *Europhysics Letters*, 2002, vol. 57, is. 1, pp. 141-147.
2. Glazkov A. S., Tipikin A. P. Metod i funkcional'naya organizatsiya kontrolya obrashchenij i zakrytiya dostupa k sektoram fajlov pri hishchenii nakopitelya informacii [Method and functional organization of access control and closing access to file sectors in case of theft of the information storage device]. *Informacionnye tekhnologii = Information technology*, 2010, no. 5, pp. 25–30 (In Russ.).
3. Tipikin A.P., Glazkov A.S., Muratov S.A. Organizatsiya pol'zovatel'skoj sistemy zashchity informacii, hpanyashchejsya na zhestkom magnitnom diske [Organization of user system for protecting information stored on a hard magnetic disk]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2009, no.10, pp.33 – 37 (In Russ.).
4. Tanygin M. O., Tipikin A. P. Aphitektupa sistemy apparatnogo ogranicheniya dostupa k informacii na zhestkom diske [Architecture of the system of hardware restriction of access to information on the hard disk of a computer]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2006, no.3, pp.44 – 46 (In Russ.).
5. PCI Special Interest Group. PCI Express® Base Specification Revision 3.0. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.694.7081&rep=rep1&type=pdf> (accessed 15.10.2019).
6. Dobrica V.P., Nepochatyh E.V., Slobodin R.S., Taldykin E.V., Tanygin M. O., Tipikin A. P. Sposob obmena dannymi mezhdru kontrollerami zashchity informacii po protokolu PCI– Express [Method of data exchange between controllers of information protection on proto-Cola PCI-Express]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2019, no.8, pp.21 – 26 (In Russ.).
7. NIST Block Cipher Modes of Operation for Confidentiality. *Cryptologia*, 2010, no. 34(2), pp. 163 – 175.
8. M. Bellare, R. Canetti, H. Krawczyk Keying hash functions for message authentication. *Advances in Cryptology*, 1996, vol. 1109 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 1 – 15.
9. Karri R., Rajendran J., Rosenfeld K. Trustworthy hardware: Identifying and classifying hardware Trojans. Moscow, Tehranipoor – Computer (Long. Beach. Calif), 2016, no.10, pp. 39 – 46.
10. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions. *J. Cryptol*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 111–131.
11. Kruti S., Gambhava B. New Approach of Data Encryption Standard Algorithm. *Int. J. Soft Comput. Eng*, 2015, no.1, 369 p.
12. Bellare M., Kilian J., Rogaway P. The security of the cipher block chaining message authentication code. *JCSS*, 1994, vol. 3, no. 3, pp. 341–358.
13. Lodneva O.N., Romasevich E.P. Analiz trafika ustrojstv interneta veshchej [Analysis of traffic devices in the Internet of things]. *Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-*

14. Zajcev V., Sokolov N. Osobennosti mul'tiservisnogo trafika s uchetoм soobshchenij, sozdavaemyh ustrojstvami IoT [Features of multiservice traffic taking into account the messages generated by IoT devices]. *Pervaya milya = First mile*, 2017, no. 4, pp. 44 – 47 (In Russ.).

15. Tanygin M.O., Alshaia H.YA., Altuhova V.A., Maruhlenko A.L. Ustanovlenie doveritel'nogo kanala obmena dannymi mezhdu istochnikom i priyomnikom informacii s pomoshch'yu modifitsirovannogo metoda odnorazovyh parolej [Establishing a trusted data exchange channel between the source and receiver of information using a modified method of disposable pairs]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 63-71 (In Russ.).

16. Katalevskij D. Yu. *Osnovy imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* [Fundamentals of simulation modeling and system analysis in management]. Moscow, 2015, pp. 62-98 (In Russ.).

17. Hellerman H. Digital Computer System Principles. McGraw-Hill, 1967, pp.134-142

18. Tkalic V.L., Labkovskaya R.Ya. *Obrabotka rezul'tatov tekhnicheskikh izmerenij* [Processing of technical measurement results]. Saint Petersburg, 2011, 72 p. (In Russ.).

19. Olifer V. G. Olifer N. A. *Pervye global'nye seti* [First global networks]. *Komp'yuternye seti. Principy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2016 (In Russ.).

20. Panagiotis Papadimitratos, Zygmunt J. Haas Secure message transmission in mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2003, no. 1, pp. 193–209.

21. Ben Othman, S., Alzaid, H., Trad, A., & Youssef, H. An efficient secure data aggregation scheme for wireless sensor networks. *IISA*, 2013, doi:10.1109/iisa.2013.6623701

Информация об авторе / Information about the Author

Максим Олегович Таныгин, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru

Maxim O. Tanygin, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-189-205>

Повышение эффективности измерений концентрации горючих газов термokatалитическим датчиком

О.Г. Бондарь¹, Е.О. Брежнева¹ ✉

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Термокatalитические датчики широко используются в газоаналитических системах и обладают высокими показателями надежности и низкой стоимостью. Однако погрешности измерения концентрации горючих газов, связанные с нелинейностью характеристики преобразования и влиянием колебаний температуры окружающей среды, значительно ограничивают область их применения. Целью исследования является разработка способа измерения концентрации газа термокatalитическими датчиками, позволяющего снизить погрешности измерения за счет отстройки от влияния температуры окружающей среды и линеаризации характеристики преобразования. Задачи исследования: разработать способ температурной стабилизации термокatalитического датчика. Разработать структурно-функциональную схему включения датчика. Получить математическое описание метода и обоснование отстройки от влияния температуры. Экспериментальным путем подтвердить возможность линеаризации функции преобразования датчика в режиме термостабилизации.

Методы. При математическом описании метода использована теория теплообмена и теория электрических цепей с дискретными сигналами. При анализе существующих решений и синтезе устройства использованы методы расчёта цепей с нелинейными элементами и теория измерительных систем. Определение реальной функции преобразования осуществлено экспериментальным методом.

Результаты. Разработан способ измерения концентрации газа термокatalитическим датчиком, реализованный с помощью микроконтроллера и ШИМ, позволяющий снизить погрешности за счет отстройки от влияния температуры окружающей среды. Приведено математическое описание метода. Проведен эксперимент, демонстрирующий эффективность применения температурной стабилизации с целью линеаризации характеристики преобразования.

Заключение. Предложен метод температурной стабилизации термокatalитических датчиков газа, позволяющий повысить точность измерения за счет отстройки от влияния колебаний температуры и линеаризации функции преобразования. Экспериментальным путем подтверждена возможность линеаризации функции датчика, характеризующей зависимость выходного сигнала от концентрации горючего газа. Применение данного метода позволяет снизить стоимость датчика, повысить качественные показатели датчика, такие как надежность и стабильность характеристик.

Ключевые слова: термокatalитический газочувствительный датчик; стабилизация температуры; микроконтроллер; функция преобразования; линеаризация; температура окружающей среды.

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

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., 2020

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О. Повышение эффективности измерений концентрации горючих газов термокаталитическим датчиком // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 189-205. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-189-205>.

Поступила в редакцию 10.12.2019

Подписана в печать 15.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Improving the Efficiency of Measurements of Combustible Gases Concentration by a Thermocatalytic Sensor

Oleg G. Bondar¹, Ekaterina O. Brezhnev¹ ✉

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Abstract

Thermocatalytic sensors are widely used in gas analysis systems and have high reliability and low cost. However, errors in measuring the concentration of combustible gases related to the non-linearity of the conversion characteristic and the influence of ambient temperature fluctuations significantly limit the scope of their application.

Purpose of research. Development of a method for measuring gas concentration by thermocatalytic sensors, which allows reducing measurement errors by tuning out due to ambient temperature influence and linearization of the conversion characteristic.

Problems. They are as follows: to develop a method for temperature stabilization of a thermocatalytic sensor; to make a structural and functional scheme for the sensor activation; to obtain a mathematical description of the method and substantiation for tuning out as a result of temperature influence; to experimentally confirm the possibility of linearization of the sensor conversion function in the thermal stabilization mode.

Methods. The mathematical description of the method applies the theory of heat transfer and the theory of electrical circuits with discrete signals. When analyzing existing solutions and synthesizing the device, methods for calculating circuits with nonlinear elements and the theory of measurement systems have been used. The real conversion function has been obtained through an experimental method.

Results. A method for measuring gas concentration by a thermocatalytic sensor with the use of a microcontroller and PWM has been developed. It allows reducing errors due to tuning out as a result of ambient temperature influence. A mathematical description of the method has been given. An experiment has been performed. It demonstrates the effectiveness of using temperature stabilization to linearize the conversion characteristic.

Conclusion. The paper proposes a method for temperature stabilization of thermocatalytic gas sensors. The method makes it possible to increase the accuracy of measurements by tuning out due to the influence of temperature fluctuations and linearization of the conversion function. The possibility of linearization of the sensor function has been experimentally confirmed. It characterizes the dependence of the output signal on the concentration of combustible gas. Using this method allows you to reduce the cost of the sensor, improve the quality factors of the sensor, such as the reliability and stability of parameters.

Keywords: thermocatalytic gas-sensitive sensor; temperature stabilization; microcontroller; conversion function; linearization; ambient temperature.

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

For citation: Bondar O. G., Brezhnev E. O. Improving the Efficiency of Measurements of Combustible Gases Concentration by a Thermocatalytic Sensor // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 189-205 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-189-205>.

Received 10.12.2019

Accepted 10.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Для детектирования горючих газов в настоящее время активно применяются термокаталитические датчики, имеющие высокое быстродействие, длительный срок службы и низкую стоимость [1,2]. Погрешности измерения концентрации газов, вызванные низкой селективностью датчиков, чувствительностью к колебаниям температуры окружающей среды, а также нелинейностью характеристики преобразования в значительной степени ограничивают их применение. Проблемы повышения селективности измерений решаются за счет обеспечения оптимальных условий процессов катализа, а также применения методов обработки информации с помощью микроконтроллеров. Отстройка от влияния колебаний температуры окружающей среды, линеаризация характеристик требует модернизации существующих схем включения датчиков.

Материалы и методы

Принцип работы термокаталитического датчика заключается в изменении сопротивления его чувствительного элемента, покрытого слоем катализатора, при протекании реакции горения на его поверхности [3]. Реакция каталитиче-

ского горения сопровождается выделением тепла, что приводит к разогреву элемента. Для компенсации влияния факторов окружающей среды используется дополнительный (компенсационный) элемент, на котором каталитическое горение не происходит вследствие отсутствия катализатора. Элементы датчика помещены в специальные керамические капсулы, которые подогреваются до определенной температуры. Значение температуры подогрева выбирается исходя из типа детектируемого газа для обеспечения селективности каталитической реакции. Оба элемента имеют двойное функциональное назначение, с одной стороны, выполняют роль термометров сопротивления, с другой, – нагревателей. Наиболее распространённой является мостовая схема включения термокаталитических датчиков [3].

В классических мостовых схемах (рис. 1) измеряемым параметром является напряжение ΔU , возникающее в результате разбалансировки моста. Причиной разбалансировки служит изменение сопротивления чувствительного элемента в результате термокаталитической реакции горения, протекающей на его поверхности при появлении детектируемого газа.

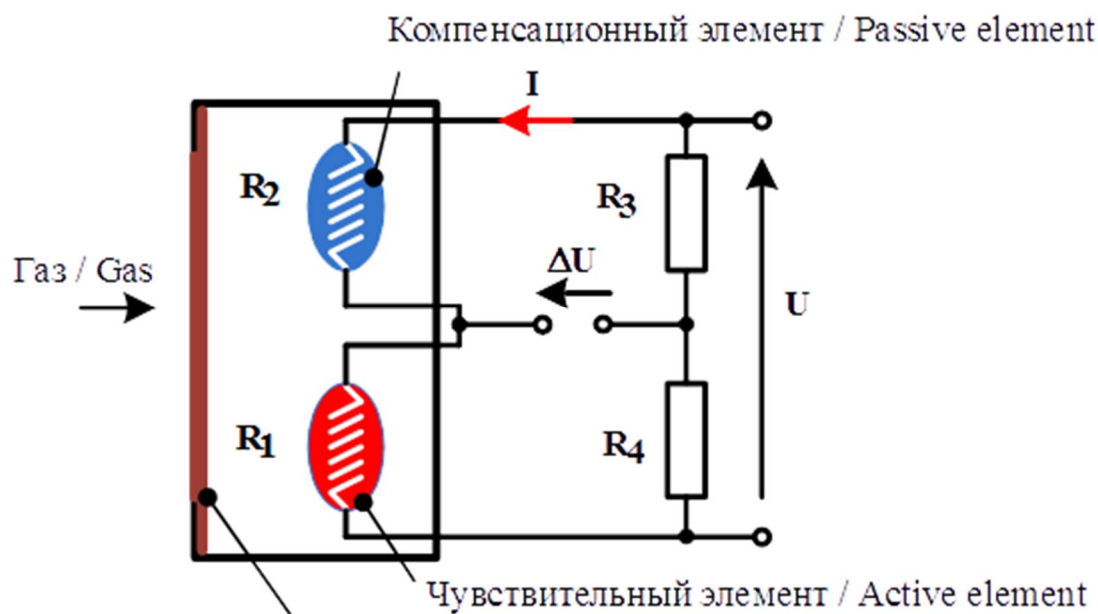


Рис. 1. Типовое включение датчика – мостовая схема

Fig. 1. Typical sensor enable – bridge

Близость расположения элементов датчика, обусловленная конструкцией, приводит к их взаимному разогреву, кроме того, имеет место лишь частичная компенсация влияния колебаний параметров среды, вследствие неравенства температурных коэффициентов [4]. Нелинейность мостовой схемы, изменения температурного коэффициента самих нагревателей и скорости протекания термokatалитической реакции приводят к нелинейности характеристики датчика. Большие концентрации горючих газов приводят к существенному возрастанию температуры чувствительного элемента, что способствует загрязнению поверхности активного элемента продуктами сгорания примесей, её растрескиванию, снижению чувствительности и срока службы датчика. Существует вероятность «горения датчика» при значительных концентрациях го-

рючего газа, проявляющаяся в саморазогреве после при снятии напряжения питания, что приводит к спеканию датчика и его отказу [5,6].

Учитывая вышесказанное, основной целью работы являлась разработка способа измерения концентрации газа термokatалитическим датчиком, позволяющего уменьшить погрешности, связанные с колебаниями температуры окружающей среды и определением приращения мощности, за счёт термokatалитической реакции.

Анализ проблемы снижения погрешности измерений термokatалитическими датчиками показал, что основным методом ослабления вышеобозначенных эффектов является поддержание постоянной температуры чувствительного элемента [7,8,9,10,11,12,13,14, 15]. При адсорбции горючего газа на чувствительном элементе растёт его темпе-

ратура, а, следовательно, и сопротивление нагревателя. Стабилизация температуры реализуется цепью обратной связи, которая отслеживает изменение падения напряжения на нагревателе и уменьшает мощность, подаваемую на датчик. Предложенный способ позволяет осуществить линеаризацию функции преобразования датчика и увеличить срок службы за счет исключения выгорания датчика и спекания катализатора. Существуют различные варианты реализации метода температурной стабилизации [6,15,16]. Для реализации изотермического режима работы датчика наиболее перспективным является применение микроконтроллера [17].

Применение параллельных или последовательных линейных регуляторов мощности подогрева неэффективно из-за их низкого коэффициента полезного действия. Альтернативой подобного подхода является применение импульсных регуляторов. Возможные варианты решения базируются на управлении средним значением подводимой мощности изменением частоты или длительности импульсов тока или напряжения.

Для целей управления рабочей температурой нагревателей каталитических датчиков целесообразным является вариант изменения длительности электрических импульсов с фиксированной частотой повторения, так называемая широтно-импульсная модуляция ШИМ. Это обусловлено необходимостью минимизации колебаний температуры при включении и выключении тока, проте-

кающего через нагреватели каталитических датчиков. Стабильность периода повторения позволяет выбором достаточно высокой частоты ШИМ обеспечить эту стабильность. В [5] для этих целей используется управляемый напряжением ШИМ-генератор тока стабильной амплитуды с изменяемой длительностью импульса $t_{\text{и}}$ и фиксированным периодом повторения T . Подобные генераторы базируются на сравнении напряжения пилообразной формы с постоянным управляющим напряжением. Компаратор, на входах которого осуществляется сравнение этих напряжений, формирует на выходе напряжение высокого или низкого уровня в зависимости от того, какое из напряжений в данный момент времени больше. Его выходной сигнал включает или выключает генератор стабильного тока. Управляющий сигнал обратной связи формируется из падения напряжения на нагревателе. Протекающий через него ток создаёт на нагревателе напряжение с амплитудой, пропорциональной величине сопротивления. В паузе это напряжение равно нулю, а поэтому для формирования управляющего ШИМ-генератором напряжения необходимо применять амплитудный детектор. Рассеиваемая нагревателем электрическая мощность определяется амплитудой падения напряжения на нём и коэффициентом заполнения $t_{\text{и}}/T$. При каталитическом окислении горючего газа дополнительная мощность повышает темпе-

ратуру нагревателя и его сопротивление. При этом возрастающее напряжение обратной связи уменьшает коэффициент заполнения ШИМ и электрическую мощность, рассеиваемую нагревателем. Это уменьшение мощности соответствует увеличению мощности за счёт реакции каталитического окисления и, следовательно, концентрации газа. Таким образом, для определения приращения мощности, выделяющейся на чувствительном элементе датчика за счёт реакции каталитического окисления, необходимо из импульсного напряжения на нагревателе чувствительного элемента сформировать напряжение, пропорциональное среднему значению мощности.

При изменении температуры окружающей среды будет изменяться электрическая мощность, подводимая к нагревателю чувствительного элемента датчика, что будет приводить к изменению выходных показаний датчика при отсутствии изменения концентрации горючего газа. Кроме того, имеется источник погрешности, связанный с выделением из последовательности прямоугольных импульсов действующего значения напряжения, преобразованием его в значение мощности рассеиваемой нагревателем датчика и определением её приращения за счёт термокаталитической реакции. Учитывая вышесказанное, недостатком данного решения является влияние температуры окружающей среды на показания датчика.

Способ температурной стабилизации и его математическое обоснование

Преимущества изотермического метода измерения заставляют искать способы борьбы с его недостатками. Эффективным способом, позволяющим устранить недостатки как типового мостового включения датчика, так и рассмотренных выше вариантов, является способ реализации изотермического режима одновременно чувствительного и компенсирующего элементов датчика [6].

Это требует двух управляемых ШИМ-генераторов, стабилизирующих температуру чувствительного и компенсационного элементов. Один ШИМ-генератор определяет ток чувствительного элемента, а второй – компенсационного. ШИМ-генераторы подключают нагреватели чувствительного и компенсационного элементов к стабилизированному источнику напряжения. По сути ШИМ-генератор является в этом случае силовым ключом, управляемым широтно-модулированными импульсами. При этом для стабилизации протекающего через нагреватели тока, последовательно с каждым из них подключается опорный резистор. Амплитуда падения напряжения на опорном резисторе стабилизируется собственной цепью обратной связи за счёт изменения коэффициента заполнения t_H/T отдельно для каждого ШИМ-генератора. Изменение среднего значения мощности нагревателей приводит к изменению их сопротивлений. Поэтому стабилизация амплитуды напряжения на опорном ре-

зисторе эквивалентна поддержанию фиксированного отношения сопротивления нагревателя к сопротивлению опорного резистора. Для исключения влияния неидентичности опорных резисторов на результаты измерения целесообразно использовать единственный общий опорный резистор.

Такой подход предъявляет дополнительные требования к ШИМ-генераторам и построению цепей обратной связи, обеспечивающих раздельное регулирование температур элементов датчика.

Во-первых, требуется исключить интермодуляцию прямоугольных импульсов двух генераторов (полное или частичное наложение импульсов). Для этого требуется обеспечить одинаковый период повторения T широтно-модулированных импульсов, сдвиг фаз импульсов $t_{\text{и}}$ и максимальную длительность не более $T/2$ для исключения их перекрытия.

Во-вторых, требуется применить синхронное с ШИМ амплитудное детектирование для выделения двух управляющих сигналов обратной связи.

Данные требования проще всего удовлетворить с использованием аппаратно-программных средств микроконтроллеров [6]. При этом аппаратные средства в виде таймеров позволяют программным способом управлять коэффициентами заполнения $K_{\text{зч}} = t_{\text{ч}}/T$ – широтно-модулированных импульсов, подогревающих чувствительный элемент и $K_{\text{зк}} = t_{\text{к}}/T$ – подогревающих компенсационный элемент. Обратная связь реализуется с помощью компарато-

ра, сравнивающего напряжение на опорном резисторе с некоторым фиксированным напряжением, определяющим номинальный ток подогрева, или измерением напряжения на нём встроенным АЦП, с последующим сравнением с цифровым кодом, соответствующим номинальному току подогрева. Результаты сравнения считываются в моменты появления импульсов подогрева чувствительного элемента $t_{\text{ч}}$, или компенсационного элемента $t_{\text{к}}$. На основании сравнения принимается решение о программном уменьшении или увеличении соответствующей длительности импульса.

Измеряемую концентрацию analyта определяют из выражения

$$C_{\text{х}} = C_0((t_{\text{ч0Т}} - t_{\text{ч}}) - C_1(t_{\text{к0Т}} - t_{\text{к}})),$$

в котором константа C_0 , определяется во время калибровки на смеси газов с известной концентрацией analyта, константы $t_{\text{ч0Т}}$, $t_{\text{к0Т}}$, являющиеся длительностями импульсов программно управляемых ШИМ-генераторов, определяются в момент калибровки при некоторой температуре окружающей среды $T_{\text{с1}}$ (её точное значение не используется) в отсутствие analyта, длительности импульсов $t_{\text{ч}}$ и $t_{\text{к}}$, программно управляемых ШИМ-генераторов определяются также в отсутствие analyта при другой температуре окружающей среды $T_{\text{с2}}$, существенно отличающейся от $T_{\text{с1}}$ (её точное значение не используется), а константа C_1 определяется как

$$C_1 = \frac{t_{\text{ч0Т}} - t_{\text{ч}}}{t_{\text{к0Т}} - t_{\text{к}}}.$$

Константы $t_{\text{Ч0T}}$, $t_{\text{К0T}}$, C_1 , C_0 – являются калибруемыми величинами. При этом только константа C_0 , определяющая чувствительность, калибруется по смеси газов с известной концентрацией аналита. Остальные константы, зависящие от неидентичности чувствительного и компенсационного элементов термодаталитического датчика и отклонения от расчётных значений параметров измерительной схемы, определяются в отсутствие аналита.

Уравнение теплового баланса для чувствительного и компенсационного элементов датчика в установившемся режиме при питании их прямоугольными импульсами тока и стабилизированных амплитудах падений напряжений них [6,18,19]:

$$P_{\text{Ч}} + P_{\text{Х}} = U_{\text{Ч}} I_{\text{Ч}} + P_{\text{Х}} = \frac{U_{\text{Ч}}^2}{R_{\text{Ч}}} + P_{\text{Х}} =$$

$$= I_{\text{Ч}}^2 R_{\text{Ч}} + P_{\text{Х}} = \delta_{\text{ТЧ}} (T_{\text{Ч}} - T_{\text{С}}); \quad (1)$$

$$P_{\text{К}} = U_{\text{К}} I_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К}}^2}{R_{\text{К}}} = I_{\text{К}}^2 R_{\text{К}} =$$

$$= \delta_{\text{ТК}} (T_{\text{К}} - T_{\text{С}}), \quad (2)$$

где $P_{\text{Ч}}$, $P_{\text{К}}$ – средние значения электрических мощностей за период ШИМ, выделяющихся на чувствительном и компенсационном элементах термодаталитического датчика (далее датчика); $P_{\text{Х}}$ – дополнительная мощность, выделяющаяся на чувствительном элементе датчика за счёт химической реакции термодаталитического окисления аналита, $R_{\text{Ч}}$, $R_{\text{К}}$ – сопротивления нагревателей чувствительного и компенсационного элемента датчика, соответственно;

$U_{\text{Ч}}$, $I_{\text{Ч}}$, $U_{\text{К}}$, $I_{\text{К}}$ – действующие значения напряжений и токов, чувствительного и компенсационного элементов датчика; $T_{\text{Ч}}$, $T_{\text{К}}$, $T_{\text{С}}$ – температура чувствительного, компенсационного элементов датчика и окружающей среды, соответственно; $\delta_{\text{ТЧ}}$ – коэффициент теплоотдачи чувствительного элемента датчика; $\delta_{\text{ТК}}$ – коэффициент теплоотдачи компенсационного элемента датчика в общем случае отличающиеся из-за невозможности точно выдержать одинаковыми геометрию элементов и состав материалов.

Исключив из выражений (1), (2) температуру среды и проведя ряд преобразований определим мощность, выделяемую за счёт химической реакции:

$$P_{\text{Х}} = \left(P_{\text{Ч0}} - \frac{\delta_{\text{ТЧ}}}{\delta_{\text{ТК}}} P_{\text{К0}} \right) - \left(P_{\text{Ч}} - \frac{\delta_{\text{ТЧ}}}{\delta_{\text{ТК}}} P_{\text{К}} \right). \quad (3)$$

Среднее значение мощности, выделяющейся при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) равно максимальному значению мгновенной мощности, умноженной на коэффициент заполнения $K_{\text{з}}$, равный отношению длительности импульса к периоду ШИМ.

Максимальные значения мгновенных мощностей, выделяющиеся при протекании тока через нагреватель чувствительного и компенсационного элементов определяются через амплитудные значения напряжений и токов нагревателей, и равны, т.к. амплитудные значения напряжения на элементах стабилизируются и их целесообразно выбирать одинаковыми для взаимной компенсации ошибок системы стабилизации температур:

$$P_M = P_{\text{ЧМ}} = U_{\text{ЧМ}} I_{\text{ЧМ}} = P_{\text{КМ}} = \\ = U_{\text{КМ}} I_{\text{КМ}} = U_{\text{ЧМ}} \frac{U_{0\text{М}}}{R_0} = U_{\text{КМ}} \frac{U_{0\text{М}}}{R_0}, \quad (4)$$

где $U_{\text{ЧМ}} = U_{\text{КМ}}$, $I_{\text{ЧМ}} = I_{\text{КМ}} = I_{0\text{М}}$ – амплитуды напряжений и токов чувствительного и компенсационного элементов, соответственно; $I_{0\text{М}}$ – амплитуда тока, протекающего через опорный резистор, под-

ключаемый поочерёдно последовательно с чувствительным или опорным элементом; $U_{0\text{М}}$, R_0 – амплитуда напряжения на опорном резисторе и величина сопротивления опорного резистора, соответственно. $U_{0\text{М}}$, R_0 – постоянные величины для конкретного газоанализатора.

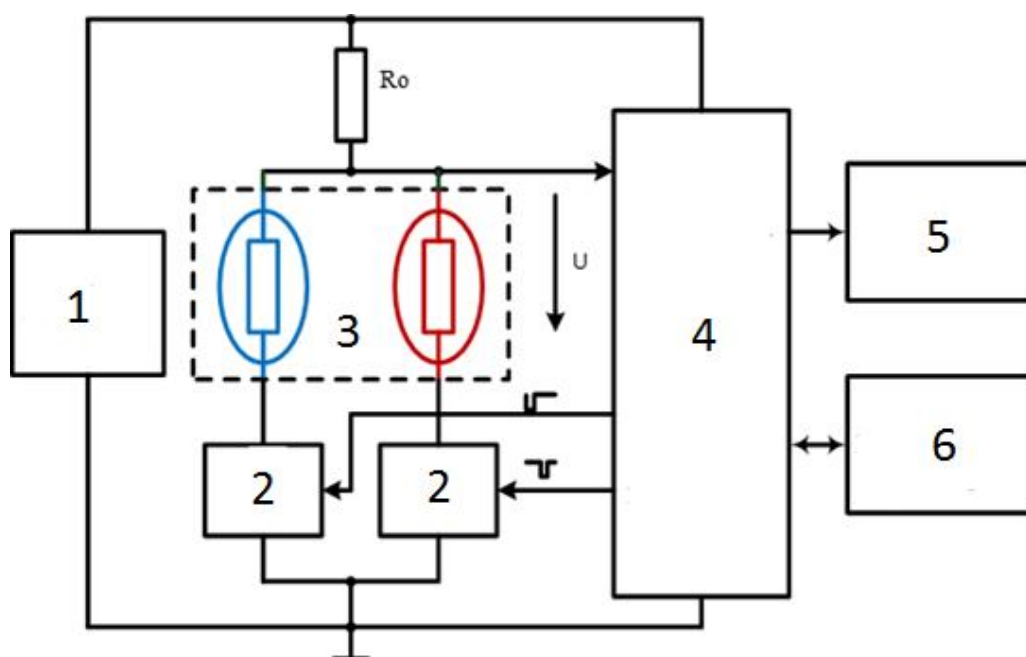


Рис. 2. Структурная схема устройства стабилизации термокаталитического датчика: 1 – источник стабильного напряжения; 2 – ключ; 3 – датчик; 4 – микроконтроллер; 5 – устройство индикации; 6 – интерфейсный адаптер

Fig. 2. Block diagram of a device for stabilizing a thermocatalytic sensor: 1 – stable voltage source; 2 – key; 3 – sensor; 4 – microcontroller; 5 – indicating device; 6 – interface adapter

Максимальное значение мгновенной мощности P_M является константой в данном способе измерения концентрации аналита и определяется выбранным напряжением питания ШИМ генераторов поочерёдно генерирующих импульсы тока в чувствительном и компенсационном элементах датчика, протекающие через общий опорный резистор, величиной сопротивления опорного ре-

зистора, и номинальной рассеиваемой мощностью на элементе датчика (значение, заданное производителем датчика).

Среднее за период ШИМ значение мощности определяется соответствующим коэффициентом заполнения:

$$P_{\text{Ч}} = P_M K_{\text{ЗЧ}}, P_{\text{К}} = P_M K_{\text{ЗК}}, P_{\text{Ч0}} = \\ = P_M K_{\text{ЗЧ0}}, P_{\text{К0}} = P_M K_{\text{ЗК0}} = P_M, \quad (5)$$

где $K_{\text{ЗЧ}}$, $K_{\text{ЗЧ0}}$ – коэффициенты заполнения для чувствительного элемента в ра-

бочем режиме и режиме калибровки (измерения без аналита); $K_{ЗК}$, $K_{ЗК0}$ – коэффициенты заполнения для компенсационного элемента в рабочем режиме и режиме калибровки.

Выражая в (3) средние значения мощностей через максимальное значение мгновенной мощности и соответствующие коэффициенты заполнения, получим:

$$P_X = P_M \left(\left(K_{ЗЧ0} - \frac{\delta_{ТЧ}}{\delta_{ТК}} K_{ЗК0} \right) - \left(K_{ЗЧ} - \frac{\delta_{ТЧ}}{\delta_{ТК}} K_{ЗК} \right) \right). \quad (6)$$

С учётом того, что коэффициенты заполнения выражаются через соответствующие длительности широтно-модулированных импульсов - t , и период ШИМ колебаний - T , а концентрация аналита связана прямо-пропорциональной зависимостью с мощностью, выделяемой при термокаталитической реакции окисления P_X , при замене отношения коэффициентов теплоотдачи константой C_1 , получим выражение для концентрации аналита:

$$C_X = C \frac{P_M}{T} ((t_{Ч0} - C_1 t_{К0}) - (t_{Ч} - C_1 t_{К})), \quad (7)$$

где $t_{Ч0}$, $t_{К0}$, $t_{Ч}$, $t_{К}$ – длительности импульсов подогрева чувствительного и компенсационного элементов, соответственно, при калибровке в отсутствии аналита и в рабочих условиях; C – коэффициент.

Заменяя постоянный множитель перед скобкой калибруемой константой C_0 и перегруппируя переменные, получим:

$$C_X = C_0 ((t_{Ч0} - t_{Ч}) - C_1 (t_{К0} - t_{К})). \quad (8)$$

Определение констант C_0 , C_1 , $t_{Ч0}$, $t_{К0}$ осуществляется при калибровке.

Для повышения точности целесообразно осуществлять усреднение длительностей ШИМ импульсов за достаточно большое целое число периодов (более 100). Частота ШИМ импульсов выбирается исходя из минимального изменения сопротивления нагревателей за период ШИМ (допускаются изменения меньше 0,1%), поэтому период ШИМ редко превышает единицы миллисекунд, а потому за время усреднения, сравнимое с временем отклика типичного датчика на скачкообразное изменение концентрации аналита, число периодов ШИМ достигает единиц тысяч.

При измерении предложенным способом информативными параметрами по которым определяется концентрация аналита являются лишь длительности импульсов подогрева чувствительного и компенсационного элементов датчика [6]. Не требуется измерения температур окружающей среды и знаний истинных температур элементов датчика ни в процессе калибровки, ни в процессе измерения концентрации аналита.

При применении программно управляемых ШИМ генераторов (на основе, например, таймеров, встроенных в микроконтроллеры), длительности импульсов в установившемся режиме являются известными программно регулируемыми величинами, обеспечивающими поддержание постоянной температуры чувствительного и компенсационного элементов датчика и непосред-

ственно определяют электрические мощности, выделяющиеся на нагревателях чувствительного и компенсационного элементов [20]. Поэтому никаких измерений электрической мощности, ухудшающих точность измерения, проводить не надо. Амплитуды падений напряжения на чувствительном и компенсационном элементах могут отклоняться от расчётного значения, но должна быть обеспечена их стабильность.

Простейший способ стабилизации напряжения на чувствительном и компенсационном элементах – это увеличение длительности соответствующего ШИМ-импульса на минимальный шаг приращения, если напряжение меньше заданного значения, и уменьшение в противоположной ситуации. Устойчивость системы регулирования достигается благодаря тому, что постоянные времени нагрева и охлаждения (инерционность тепловых процессов) существенно превышают период ШИМ, что обеспечивается выбором периода ШИМ.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показана временная диаграмма управляющих ключами импульсов ШИМ-генераторов. Факторами, повышающими точность устройства, являются использование единого опорного резистора и общего для двух элементов датчика уровня стабилизируемого напряжения, что позволяет исключить погрешность, возникающую в контуре стабилизации в случае различных уровней. Данный способ измерения позво-

ляет исключить влияние на точность измерений дополнительных факторов, связанных с проблемами технологического характера, таких как различие температур и коэффициентов теплопроводности чувствительного и компенсационного элементов.

На разработанном прототипном модуле с термокаталитическим датчиком водорода *NP-AHS* фирмы *Nemoto* экспериментальным путем была получена функция преобразования датчика, работающего в режиме температурной стабилизации (рис. 4). Статическим объёмным методом при нормальных условиях ($RH=65\%$, $T=25^{\circ}\text{C}$ $P=101,3$ кПа) готовились газовые смеси (водород / воздух) с содержанием водорода от 0 до 5% об. с шагом 0,2% об.

В основу прототипного модуля положен микроконтроллер на ядре AVR фирмы *Microchip*. Достоинство этого микроконтроллера состоит в высокой производительности (16-20 MIPS), развитой периферии, наличии дешёвых программаторов, бесплатных сред разработки программного обеспечения.

Ключи генераторов тока построены на полевых транзисторах с малым сопротивлением открытого канала. Схемы управления ключами содержат ёмкостную развязку для исключения аварийных ситуаций, приводящих к появлению на зажимах постоянных напряжений, открывающих ключи на длительные интервалы времени и выводящих из строя нагреватели элементов датчика.

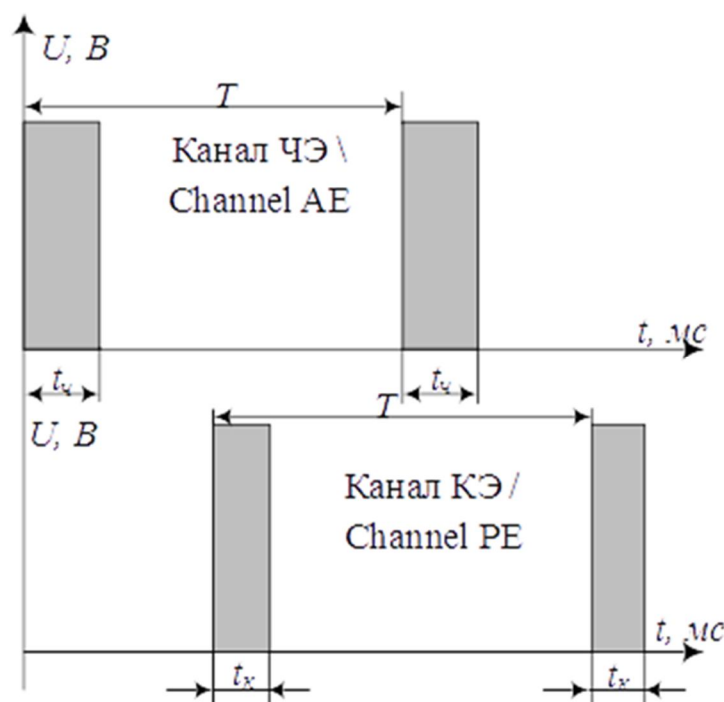


Рис. 3. Временная диаграмма управляющих импульсов ШИМ генераторов:
ЧЭ – чувствительный элемент; КЭ – компенсационный элемент

Fig. 3. Timing diagram of the control pulses of *PWM* generators: t_A – active element time,
 t_P – passive element time; *AE* – active element; *PE* – passive element

При этом схема фиксации уровня исключает изменение амплитуды открывающих импульсов при изменении коэффициента заполнения широтно-модулированных импульсов.

В табл. 1 приведены основные технические параметры. Для получения максимальной чувствительности сопротивление компенсационного элемента

R_K было выбрано равным сопротивлению чувствительного элемента $R_{\text{ч}}$.

Учитывая, что $R_{\text{ч}}$ и R_K образуют делитель, определялась амплитуда тока:

$$I = \frac{E_{\text{п}}}{R_{\text{ч}} + R_K} = 0,45 \text{ A}.$$

Коэффициент заполнения рассчитывался как соотношение номинальной $P_{\text{н}}$ и мгновенных P мощностей в отсутствие определяемого газа.

Таблица 1. Основные технические параметры

Table 1. Main technical parameters

$R_K, \text{ Ом} /$ $R_{\text{PE}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ч}}, \text{ Ом} /$ $R_{\text{AE}}, \text{ Ом}$	$I_{\text{п}}, \text{ А} /$ $I_s, \text{ А}$	$P, \text{ Вт} /$ $P, \text{ Вт}$	$P_{\text{н}}, \text{ Вт} /$ $P_{\text{н}}, \text{ Вт}$	$K_3, \text{ Вт} /$ $K_{\text{ф}}, \text{ Вт}$	$E_{\text{п}}, \text{ В} /$ $E_s, \text{ В}$
5,5	5,5	0,45	2,25	0,232	0,103	5

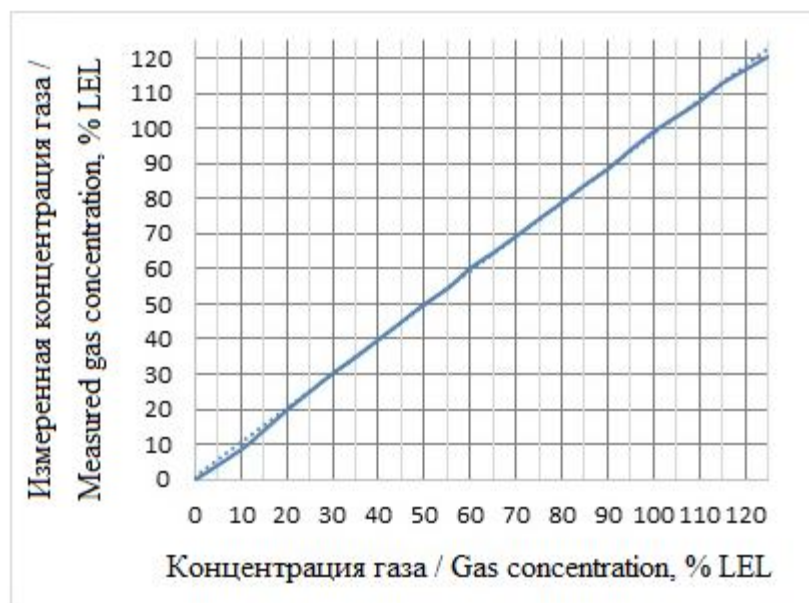


Рис. 4. Функция преобразования модуля с датчиком, работающим в изотермическом режиме

Fig. 4. Conversion function of a module with a sensor operating in isothermal mode

Ранее численным методом была проведена оценка нелинейности функции преобразования термокаталитического датчика, работающего в стандартной схеме включения. Проведенные расчеты и анализ позволили получить теоретическую оценку нелинейности характеристики преобразования для предложенного метода на уровне 1%, против 27% в мостовой схеме включения. На основании полученных результатов были сделаны выводы о доминирующем вкладе в нелинейность характеристики преобразования мостовой схемы включения датчика. Предполагалось, что источниками остаточной нелинейности мостовой схемы могут служить зависимости скорости реакции и условий теплоотдачи элементов датчика от температуры активного элемента.

Выводы

Предложен метод температурной стабилизации термокаталитических датчиков газа, позволяющий повысить точность измерения за счет отстройки от влияния колебаний параметров среды, неидентичности элементов датчика и линеаризации функции преобразования. Получено математическое описание работы датчика в режиме термостабилизации. Проведена оценка нелинейности функции преобразования для датчиков, имеющих классическую схему включения. Экспериментальным путем подтверждена возможность линеаризации функции датчика, характеризующей зависимость выходного сигнала от концентрации горючего газа. Применение данного метода позволяет снизить стоимость датчика, повысить качественные показатели датчика, такие как надежность и стабильность характеристик.

Список литературы

1. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017–2027. Cambridge, UK: CISION, 2017. 166 p.
2. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. A wireless sensor-actuator system for hazardous gases detection and control // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 210. P.157-164.
3. Дрейзин В. Э., Брежнева Е.О., Бондарь О. Г. Моделирование каталитического датчика водорода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. Ч. 1. № 5(38). С. 69-76.
4. Developments in gas sensor technology for hydrogen safety / T. Hübert, L. Boon-Brett, V. Palmisano, M. A. Bader // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39. P. 20474-20483.
5. Пат. РФ № 2304278, G01N27/12 «Способ стабилизации параметров микронагревателя измерительного элемента газового датчика и устройство для его осуществления», 10.08.2007, Бюл. № 22.
6. Пат. РФ № 2698936. Российская Федерация, МПК G01N 27/12 (2006.01), H03K 3/72 (2006.01). Способ измерения концентрации газа каталитическим датчиком / Бондарь О.Г., Брежнева Е.О. № 2018147099; заявл. 28.12.2018; опубл. 02.09.2019, Бюл. № 25. 1 с.
7. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Полякова А.В. Применение микроконтроллера для температурной стабилизации полупроводниковых газочувствительных датчиков // Датчики и системы 2014. №2. С. 41-46.
8. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement / E. E. Karpov, E. F. Karpov, A. Suchkov, S. Mironov, A. Baranov, V. Sleptsov, L. Calliari // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. Vol. 194. P. 176–180.
9. Increase of catalytic sensors stability / E. Karpova, S. Mironov, A. Suchkov, A. Karelin, E. E. Karpov, E. F. Karpov // Sensors and Actuators B: Chemical. 5 July 2014. Vol. 197. P. 358-363.
10. Improving interoperability of catalytic sensors / A. Somov, A. Baranov, Alexey Suchkov, A. Karelin, S. Mironov, E. Karpova // Sensors and Actuators B: Chemical. December 2015. Vol. 221, 31 P. 1156-1161. ISSN 0925-4005
11. Wireless multi-sensor gas platform for environmental monitoring / D. Spirjakin, A. Baranov, A. Karelin, A. Somov // Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2015 IEEE Workshop on, 10 July 2015. P. 232-237.
12. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement / E. F. Karpov, E. E. Karpov, A. Suchkov, S. Mironov, A. Baranov, V. Sleptsov, L. Calliari // Sensors and Actuators A: Physical. May 2013. Vol.194. P. 176-180.

13. Абдурахманов Э. А., Рузиев Э. А. Селективные термokatалитические сенсоры в экологическом мониторинге газообразных выбросов // Химическая промышленность. 2003. Т. 80. № 9. С. 444-449.
14. Mao S., Lu G., Chen J. Nanocarbon-based gas sensors: progress and challenges // J. Mater. Chem. A. 2014. Vol. 2. P. 5573-5579.
15. Пат. РФ № 2544358. Российская Федерация, МПК G01N 27/18 (2006.01). Способ измерения до взрывных концентраций горючих газов в воздухе / Карпова Е. Е., Миронов С.М., Сучков А.А., Карпов Е.Е., Карпов Е.Ф. № 2013130480/28; заявл. 04.07.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. 1 с.
16. Пат. РФ № 2623828. Российская Федерация, МПК G01N 27/16 (2006.01), G01N 25/22 (2006.01), Способ измерения концентрации горючих газов и паров в воздухе термokatалитическим сенсором диффузионного типа / Карпова Е. Е., Миронов С.М., Сучков А.А., Карпов Е.Е., Карпов Е.Ф. № 2013130480/28; заявл. 04.07.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. 1 с.
17. Kolmakov A., Sysoev V. V. Analyte multi-sensor for the detection and identification of analyte and a method of using the same. Патент США US8443647. Опубл. 21.05.2013.
18. Hydrogen sensors – A review// Sensors and Actuators B / T. Hubert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banacha // Chemical. 2011. P. 329-352
19. Applying Catalytic Sensor in Non-volatile Wireless Sensor Networks / A. Karelin, E.E. Karpov, E.F. Karpov, S Mironov., A. Baranov, V. Sleptsov, K. Napolsky // Procedia Engineering. 2015. Vol. 120. P. 1019-1023.
20. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty cycling for power saving // Sensors and Actuators B. 2017. Vol. 239. P. 1003-1009.

References

1. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017–2027. Cambridge, UK, CISION Publ., 2017. 166 p.
2. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. A wireless sensor-actuator system for hazardous gases detection and control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 210, pp. 157-164.
3. Dreyzin V. E., Brezhnev E. O., Bondar O. G. Modelirovanie kataliticheskogo datchika vodoroda [Modeling of catalytic hydrogen sensor]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, pt. 1, no. 5 (38), pp. 69-76 (In Russ.).
4. Hübert T., BoonBrett L., Palmisano V., Bader M. A. Developments in gas sensor technology for hydrogen safety. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 20474-20483.
5. *Sposob stabilizatsii parametrov mikronagrevatelya izmeritel'nogo elementa gazovogo datchika i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for stabilizing the parameters of

the microheater of the gas sensor measuring element and a device for its implementation"]. Patent RF, no. 2304278, G01N27. 2007.

6. Bondar O. G., Brezhnev E. O. *Sposob izmereniya kontsentratsii gaza kataliticheskim datchikom* [Method of measuring gas concentration by catalytic sensor]. Patent RF, no. 2698936, 2019.

7. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Polyakova A.V. *Primenenie mikrokontrollera dlya temperaturnoi stabilizatsii poluprovodnikovyykh gazochuvstvitel'nykh datchikov* [Application of microcontroller for temperature stabilization of semiconductor gas-sensitive sensors]. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*, 2014, no. 2, pp. 41-46 (In Russ.).

8. Karpov E. E., Karpov E. F., Suchkov A., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 194, pp. 176–180.

9. Karpova E., Mironov S., Suchkov A., Karelin A., Karpov E. E., Karpov E. F. Increase of catalytic sensors stability. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 5 July 2014, vol. 197, pp. 358-363.

10. Somov A., Baranov A., Suchkov A., Karelin A., Mironov S., Karpova E. Improving interoperability of catalytic sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 31 December 2015, vol. 221, , pp. 1156-1161, ISSN 0925-4005.

11. Spirjakin D., Baranov A., Karelin A., Somov A. Wireless multi-sensor gas platform for environmental monitoring. *Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, 2015 IEEE Workshop on, 10 July 2015, pp. 232-237.

12. Karpov E. F., Karpov E.E., Suchkov A., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, May 2013, vol. 194, pp. 176-180.

13. Abdurakhmanov E. A., Ruziev E. A. *Selektivnye termokataliticheskie sensory v ekologicheskom monitoringe gazoobraznykh vybrosov* [Selective thermocatalytic sensors in environmental monitoring of gaseous emissions]. *Khimicheskaya promyshlennost' = Chemical industry*, 2003, vol. 80, no. 9, pp. 444-449 (In Russ.).

14. Mao S., Lu G., Chen J. Nanocarbon-based gas sensors: progress and challenges. *J. Mater. Chem. A*, 2014, vol. 2, pp. 5573-5579.

15. Karpova E. E., Mironov S. M., Suchkov A. A., Karpov E. E., Karpov E. F. *Sposob izmereniya dovozryvnykh kontsentratsii goryuchikh gazov v vozdukh* [Method for measuring pre-explosive concentrations of combustible gases in air]. Patent RF, no. 2544358, 2015.

16. Karpova E. E., Mironov S. M., Suchkov A. A., Karpov E. E., Karpov E. F. *Sposob izmereniya kontsentratsii goryuchikh gazov i parov v vozdukh termokataliticheskim sensorom diffuzionnogo tipa* [Method for measuring the concentration of combustible gases and vapors in the air with a diffusion-type thermocatalytic sensor]. Patent RF, no. 2623828, 2015.

17. Kolmakov A., Sysoev V. V. Analyte multi-sensor for the detection and identification of analyte and a method of using the same / -us Patent US8443647. Publ. 21.05.2013.
 18. Hubert T., Boon-Brett L., Black G., Banacha U. Hydrogen sensors – A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, pp. 329-352.
 19. Karelin A., Karpov E.E., Karpov E.F., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Napolsky K. Applying Catalytic Sensor in Non-volatile Wireless Sensor Networks. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 120, pp. 1019-1023.
 20. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty cycling for power saving. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 239, pp. 1003-1009.
-

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

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

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

Способ реализации адаптации робота к изменениям режима контактного взаимодействия с использованием глубоких полносвязных нейронных сетей

С.И. Савин¹, Л.Ю. Ворочаева²✉, А.В. Мальчиков²,
А.М. Салихзянов¹, Э.М. Заляев¹

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

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

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Данная работа посвящена проблеме использования предикторов реакций в системе управления двуногими шагающими роботами. Главным преимуществом использования предикторов является возможность исключения неизвестных сил реакций из уравнений динамики и, следовательно, из постановок задач управления роботом, основанных на модели. Также обсуждается дополнительное преимущество предикторной постановки задач управления, а именно возможность ее использования для прогнозирования изменений режимов контактного взаимодействия, таких как проскальзывание или отрыв от опорной поверхности.

Методы. В работе используются следующие методы: метод динамики многомассовых систем необходим для разработки математической модели поведения шагающего робота и описания его контактного взаимодействия с опорной поверхностью, метод нейронных сетей используется для разработки предиктора, позволяющего предсказывать значения реакций между стопой робота и поверхностью.

Результаты. В статье показано, что имеет место связь между частотами гармонических составляющих движений робота (отношением r этих частот в эксперименте и обучающей выборке) и качеством работы предиктора реакций опорной поверхности. Это указывает на важность использования репрезентативного спектра частот движений шагающих роботов при формировании обучающей выборки и на плохую обобщаемость предиктора по отношению к частоте движений.

Заключение. В статье изучен вопрос использования предиктора реакций для выявления возможности изменения режима контактного взаимодействия, основанный на измерении расхождений между локальными линеаризациями для различных дискретных шагов. Полученные в данной работе результаты найдут применение при разработке системы управления движением двуногого шагающего робота, позволяющей устройству адаптироваться к параметрам опорной поверхности, по которой происходит движение.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот; полносвязные нейронные сети; прогнозирование; режим контактного взаимодействия.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Гранта Президента МК-1537.2019.8.

Для цитирования: Способ реализации адаптации робота к изменениям режима контактного взаимодействия с использованием глубоких полносвязных нейронных сетей / С.И. Савин, Л.Ю. Ворочаева, А.В. Мальчиков, А.М. Салихзянов, Э.М. Заляев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 206-214. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-206-214>.

Поступила в редакцию 07.12.2019

Подписана в печать 12.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Implementation Method of the Robot Adaptation to Contact Interaction Mode Changes Using Deep Fully Connected Neural Networks

Sergey I. Savin¹, Lyudmila Yu. Vorochaeva² ✉, Andrey V. Malchikov²,
Alek M. Salikhzyanov¹, Eduard M. Zalyaev¹

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

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

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The present paper concerns the problem of using reaction predictors in the control system of bipedal walking robots. The main advantage of using predictors is the ability to exclude unknown reaction forces from the dynamics equations and, consequently, from the robot control problem statements based on the model. An additional advantage of predictor setting of control tasks is also discussed in the paper, namely the possibility of its use to predict changes in contact interaction modes, such as slipping motion or foot lifting from the supporting surface.

Methods. The following methods are used in the research: the method of dynamics of multi-mass systems is necessary for developing a mathematical model of the behavior of a walking robot and describing its contact interaction with the support surface, the method of neural networks is used to develop a predictor that allows one to forecast the values of reactions between the robot's foot and the surface.

Results. The paper shows that there is a connection between the frequencies of the harmonic components of robot movements (the ratio p of these frequencies in the experiment and the training sample) and the quality of reactions predictor operation of the support surface. This indicates the importance of applying a representative spectrum of walking robot movement frequencies in forming a training sample, and the poor generalizability of the predictor in relation to movement frequency.

Conclusion. The paper has considered the use of a reaction predictor to identify the possibility of changing the mode of contact interaction, based on the measurement of discrepancies between local linearizations for various discrete steps. The results obtained in this work will be used in the development of a motion control system for a bipedal walking robot, which allows the device to adapt to the parameters of the support surface on which the movement occurs.

Keywords: bipedal walking robot; fully connected neural networks; forecasting; contact interaction mode.

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

Funding: This work was supported by the Grant of the President MK-1537.2019.8.

For citation: Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Malchikov A. V., Salikhzyanov A.M., Zalyaev E.M. Implementation Method of the Robot Adaptation to Contact Interaction Mode Changes Using Deep Fully Connected Neural Networks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 206-214 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-206-214>.

Received 07.12.2019

Accepted 12.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Шагающие роботы являются одним из наиболее перспективных направлений современной робототехники, нацеленным на решение целого ряда задач: от перемещения по неровной и сложной местности до достижения антропоморфного типа передвижения. Существуют двуногие, четвероногие и многоногие конструкции роботов, гусеницеподобные, внутритрубные и даже подводные шагающие роботы [1-3]. В частности, антропоморфные двуногие (человекоподобные) роботы интересны тем, что они должны дополнительно обеспечивать преимущества простой интеграции в существующую социальную и городскую инфраструктуру.

В современной антропоморфной робототехнике остается актуальным вопрос вертикального равновесия робота. Существуют классические подходы, основанные на предположениях о плоскости опорной поверхности и достаточном трении, такие как определение положения точки нулевого момента (ZMP) [4, 5]. Также существуют методы, позволяющие рассуждать непосредственно о контактных силах реакции, такие как метод множественного контакта со средой с точки зрения теории винтового исчисления (CWC) [6]. Оба метода основаны на предположении, что режим контактного взаимодействия с опорной поверхностью точно установлен пред-

ложенной моделью. Известны работы по внедрению информации о режимах контактного взаимодействия непосредственно в постановку задачи управления. Существует множество различных способов, например, использование метода обучения с подкреплением сигналами от среды взаимодействия [7, 8], усиление критериев выбора параметров для существующих методов на основе их эффективности при моделировании [9]. Использование методов машинного обучения представляет особый интерес, поскольку они позволяют легко интегрировать дополнительные данные, являются гибкими по отношению к типам данных (экспериментальным или основанным на моделировании), и поскольку они производят предсказуемо (с точки зрения вычислительного времени) работающие программные модули, которые могут быть проанализированы с помощью статистических инструментов.

В работе [10] предложено использовать нейронные сети с плотной структурой для обучения предиктора контактных сил реакций. Данные для обучения собраны в процессе моделирования, а нейронная сеть построена с использованием стандартных инструментов, таких как Tensorflow и Keras. Обученный агент способен предсказывать силы реакций с приемлемой точностью, что позволяет использовать его в системе управления.

Также в работе [10] предложено использование агента для построения локально линейной модели контактного взаимодействия робота. Линейная модель может быть использована для замены сил реакций в постановках задач управления. Это позволяет применять классические алгоритмы управления, разработанные для систем без явных механических ограничений для ограниченных систем, что, в свою очередь, позволяет избежать проблем, связанных с формированием требуемых управляющих сигналов для таких систем [11, 12].

Материалы и методы

Плоский шагающий робот

Объектом исследования является семизвенный плоский шагающий робот, описанный в работе [10] и состоящий из корпуса и двух ног, каждая из которых включает в себя три звена (бедро, голень и стопу). Звенья моделируются стержнями, центры масс которых совпадают с центрами симметрии стержней. Стержни соединены между собой вращательными шарнирами с установленными в них приводами.

Остановимся на рассмотрении одноопорной фазы движения, когда одна из стоп робота находится на поверхности, а вторая оторвана от нее. При этом в стопе, взаимодействующей с поверхностью, возникают две силы нормальной реакции λ_1 и λ_2 и сила трения λ_3 , как показано на рис. 1.

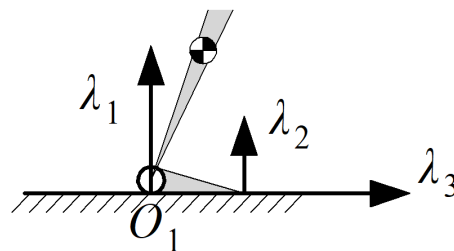


Рис. 1. Силы взаимодействия стопы робота с поверхностью

Fig. 1. Forces of interaction of the robot foot with the surface

Линеаризованная модель контакта

Предположим, что модель робота описывается следующими уравнениями:

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}^T \boldsymbol{\lambda}, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ – обобщенная матрица инерции; $\ddot{\mathbf{q}}$ – обобщенные ускорения; $\mathbf{c}$ – обобщенный вектор смещения; $\boldsymbol{\tau}$ – обобщенные крутящие моменты; $\mathbf{F}$ – Якобиан; $\boldsymbol{\lambda}$ – вектор сил реакции.

Тогда предиктор реакций задается следующим образом:

$$\boldsymbol{\lambda} = P(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\tau}). \quad (2)$$

С помощью предиктора (2) можно перейти к линеаризованной модели для $\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0, \boldsymbol{\tau}_0$:

$$\boldsymbol{\Lambda} = \frac{1}{\alpha} [\lambda_1 - \lambda_0 \quad \dots \quad \lambda_m - \lambda_0], \quad (3)$$

$$\lambda_0 = P(\dot{\mathbf{q}}_0, \mathbf{q}_0, \boldsymbol{\tau}_0), \quad (4)$$

$$\lambda_i = P(\dot{\mathbf{q}}_0, \mathbf{q}_0, \boldsymbol{\tau}_0 + \alpha \delta_i), \quad (5)$$

где δ_i – базисный вектор в ортонормированном базисе в пространстве реакционных сил; α – скалярный коэффициент, определяющий локальность линеаризации.

Тогда локальная линеаризованная модель сил реакции задается как

$$\lambda = \Lambda u + \lambda_0. \quad (6)$$

Это выражение может быть непосредственно подставлено в модель (1), исключая неизвестные алгебраические переменные λ из задачи управления на основе динамики робота:

$$H\ddot{q} + c = \tau + F^T(\Lambda u + \lambda_0), \quad (7)$$

где полученная система уравнений уже не ДАУ (дифференциально-алгебраические уравнения), а ОДУ.

Прогнозирование изменения контактного режима

Анализируя выражения (3)-(6), можно отметить, что выбор α должен соответствовать ожидаемой разнице между τ и τ_0 . Предположим, что режим контакта претерпевает быстрое изменение в точке $(\dot{q}_0, q_0, \tau_0 + \alpha_c \delta_k)$, где α_c – это критическое значение α , например, из-за пересечения границ конуса трения. Важно заметить, что линеаризация для управления, формирующего обобщенные крутящие моменты $\tau \geq \tau_0 + \alpha_c \delta_k$, отличается от линеаризации для управления, генерирующего обобщенные крутящие моменты $\tau < \tau_0 + \alpha_c \delta_k$. Рассмотрим задачу распознавания этого сценария, обозначив тот факт, что модель контактного взаимодействия претерпела быстрое изменение вблизи текущей точки в пространстве состояний-действий. Произ-

ведем две линеаризации для $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$. Обозначим матрицы линеаризации как $\Lambda_{\min}$ и $\Lambda_{\max}$. Тогда можно ввести аддитивный критерий σ_1 :

$$\sigma_1 = \|\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}\|_F, \quad (8)$$

где $\|\cdot\|_F$ – норма матрицы Фробениуса. В качестве альтернативы можно использовать мультипликативный критерий σ_2 :

$$\sigma_2 = \|\Lambda_{\max}^+ \Lambda_{\min}\|_F. \quad (9)$$

Значения σ_1 или σ_2 можно сравнить с экспериментально найденным пороговым значением σ_c . Тогда задача прогнозирования изменения режима контактного взаимодействия может быть упрощена до задачи нахождения правильных пороговых значений σ_c , что может быть сделано экспериментально, теоретически или с помощью моделирования с использованием ручной настройки или с помощью машинного обучения.

Результаты и их обсуждение

Проведем моделирование робота со следующими параметрами: масса корпуса $m_1=20$ кг, массы бедра и голени $m_{2,3}=10$ кг, масса стопы $m_4=5$ кг, длины корпуса, бедра и голени $L_{1,3}=0.6$ м, длина стопы $L_4=0.2$ м. При проведении экспериментов используются многослойные перцептроны.

Для оценки качества предсказания сил реакции введен параметр p :

$$p = \frac{n_{ms}}{n_{vs}}, \quad (10)$$

где n_{ms} — частота движений, заданных суммой гармонических сигналов; n_{vs} — частота движений, задаваемых при формировании обучающей выборки.

Результаты моделирования в виде зависимостей нормальных реакций и сил трения от номера i итерации в процессе моделирования и предсказания представлены на рис. 2 и рис. 3. На данных рисунках приняты следующие обозначения: λ_{1-3} — наблюдаемые реакции; $\tilde{\lambda}_{1-3}$ — предсказанные реакции.

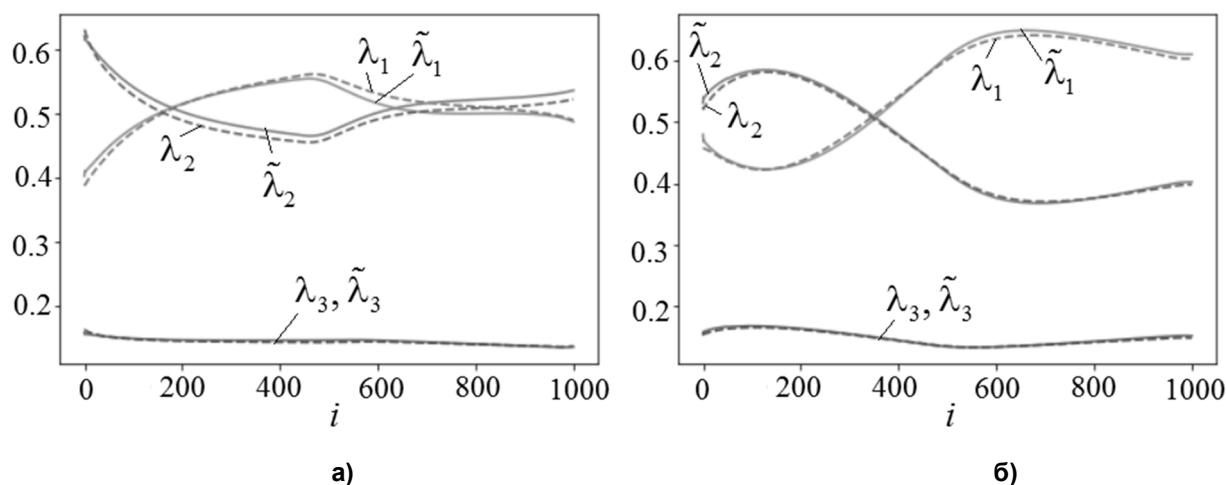


Рис. 2. Графики $\lambda_{1-3}(i)$ при $p \approx 1$: **а** – первый эксперимент; **б** – второй эксперимент

Fig. 2. Graphs $\lambda_{1-3}(i)$ at $p \approx 1$: **a** – first experiment; **б** – second experiment

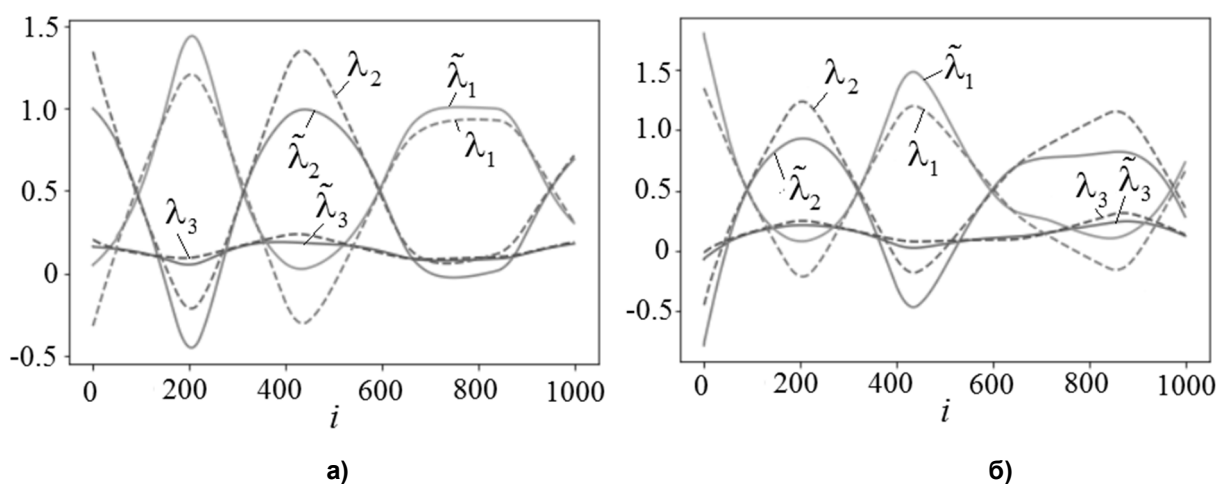


Рис. 3. Графики $\lambda_{1-3}(i)$ при $p \approx 2$: **а** – первый эксперимент; **б** – второй эксперимент

Fig. 3. Graphs $\lambda_{1-3}(i)$ at $p \approx 2$: **a** – first experiment; **б** – second experiment

На основании анализа графиков рис. 2 и рис. 3 можно сделать вывод о том, что качество предсказаний падает при повышении параметра p . Корректным считается значение $p \approx 1$.

Выводы

В данной статье рассмотрен вопрос использования предиктора реакций для выявления возможности изменения режима контактного взаимодействия. Концепция метода состоит в том, чтобы измерять расхождение между локальными

линеаризациями, параметризованными скалярной переменной, действующей как длина дискретного шага, для различных дискретных шагов. Расхождение может быть измерено в аддитивном или мультипликативном смысле.

Этот подход прост в постановке, однако существенно зависит от объема информации о направлении (или местоположении), в котором произойдет изменение режима контактного взаимодействия.

Список литературы

1. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot / N.A. Radford, P. Strawser, K. Ham-buchen, J. S. Mehling, W. K. Verdeyen, A. S. Donnan, ... R. Berka // J. of Field Robotics. 2015. Vol. 32(3). P. 397-419.
2. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes // MATEC Web of Conf. EDP Sciences. 2017. Vol. 113. P. 1-5.
3. Development on walking robot for underwater inspection / J. Akizono, M. Iwasaki, T. Nemoto, O. Asakura // Advanced Robotics. 1989. P. 652-663.
4. Vukobratović M., Borovac B. Zero-moment point—thirty five years of its life // Intern. J. of humanoid robotics. 2004. Vol. 1(01). P. 157-173.
5. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point / S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa // Robotics and Automation: Proc. IEEE Intern. Conf. 2003. Vol. 2. P. 1620-1626.
6. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Stability of surface contacts for humanoid robots: Closed-form formulae of the contact wrench cone for rectangular support areas // ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Seattle, WA, USA, 2015. P. 5107-5112.
7. Levine S., Wagener N., Abbeel P. Learning contact-rich manipulation skills with guided policy search // ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Seattle, WA, USA, 2015. arXiv preprint arXiv:1501.05611.
8. Sim-to-real: Learning agile locomotion for quadruped robots / J. Tan, T. Zhang, E. Coumans, A. Iscen, Y. Bai, D. Hafner, V. Vanhoucke // arXiv preprint arXiv:1804.10332. 2018.

9. Savin S., Khusainov R., Klimchik A. Admissible region ZMP trajectory generation for bipedal robots walking over uneven terrain // *Zavalishin's Readings: Proc. 14th Intern. Conf. on Electromechanics and Robotics*. Springer, Singapore, 2020. P. 125-136.
10. Savin S. Neural Network-Based Reaction Estimator for Walking Robots // *RusAutoCon: Proc. IEEE Intern. Russian Automation Conf.* Sochi, Russia, 2018. P. 1-6.
11. Aghili F. A unified approach for inverse and direct dynamics of constrained multi-body systems based on linear projection operator: applications to control and simulation // *IEEE Transactions on Robotics*. 2005. Vol. 21(5). P. 834-849.
12. Laine F., Tomlin C. Efficient Computation of Feedback Control for Constrained Systems // *arXiv preprint arXiv:1807.00794*. 2018.

References

1. Radford N.A., Strawser P., Hambuchen K., Mehling J. S., Verdeyen W. K., Donnan A. S., ... Berka R. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot. *J. of Field Robotics*, 2015, vol. 32(3), pp. 397-419.
2. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes. *MATEC Web of Conf. EDP Sciences*, 2017, vol. 113, pp. 1-5.
3. Akizono J., Iwasaki M., Nemoto T., Asakura O. Development on walking robot for underwater inspection. *Advanced Robotics*, 1989, pp. 652-663.
4. Vukobratović M., Borovac B. Zero-moment point—thirty five years of its life. *Intern. J. of humanoid robotics*, 2004, vol. 1(01), pp. 157-173.
5. Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. *Robotics and Automation: Proc. IEEE Intern. Conf.*, 2003, vol. 2, pp. 1620-1626.
6. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Stability of surface contacts for humanoid robots: Closed-form formulae of the contact wrench cone for rectangular support areas. *ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, Seattle, WA, USA, 2015, pp. 5107-5112.
7. Levine S., Wagener N., Abbeel P. Learning contact-rich manipulation skills with guided policy search. *ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. Seattle, WA, USA, 2015. *arXiv preprint arXiv:1501.05611*.
8. Tan J., Zhang T., Coumans E., Iscen A., Bai Y., Hafner D., Vanhoucke V. Sim-to-real: Learning agile locomotion for quadruped robot. *arXiv preprint arXiv:1804.10332*. 2018.
9. Savin S., Khusainov R., Klimchik A. Admissible region ZMP trajectory generation for bipedal robots walking over uneven terrain. *Zavalishin's Readings: Proc. 14th Intern. Conf. on Electromechanics and Robotics*. Springer, Singapore, 2020, pp. 125-136.

10. Savin S. Neural Network-Based Reaction Estimator for Walking Robots. RusAuto-Con: Proc. IEEE Intern. Russian Automation Conf. Sochi, Russia, 2018, pp. 1-6.
11. Aghili F. A unified approach for inverse and direct dynamics of constrained multi-body systems based on linear projection operator: applications to control and simulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, vol. 21(5), pp. 834-849.
12. Laine F., Tomlin C. Efficient Computation of Feedback Control for Constrained Systems. arXiv preprint arXiv:1807.00794. 2018.

Информация об авторах / Information about the Authors

Савин Сергей Игоревич, 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, Cand. of Sci. (Engineering), Higher Senior Officer, Laboratory of Mechatronics, Management and Prototyping, Innopolis University, Innopolis, Russian Federation
e-mail: s.savin@innopolis.ru

Ворочаева Людмила Юрьевна, 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, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: mila180888@yandex.ru

Мальчиков Андрей Васильевич, 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, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University,
e-mail: zveroknnp@gmail.com

Салихзянов Алек Марселевич, студент, Университет Иннополис, г. Иннополис, Российская Федерация, e-mail: a.salikhzyanov@innopolis.ru

Alek M. Salikhzyanov, Student, Innopolis University, Innopolis, Russian Federation,
e-mail: a.salikhzyanov@innopolis.ru

Заляев Эдуард Маратович, студент, Университет Иннополис, г. Иннополис, Российская Федерация, e-mail: e.zalyaev@innopolis.ru

Eduard M. Zalyaev, Student, Innopolis University, Innopolis, Russian Federation,
e-mail: e.zalyaev@innopolis.ru