

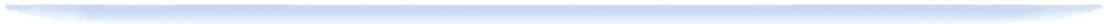
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 23 № 6 / 2019



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 23 № 6 / 2019



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

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, 2019



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

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

Периодичность: один раз в два месяца

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 23.12.2019. Формат 60х84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 31,4.
Тираж 1000 экз. Заказ 105.



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 in 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);

Schah 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"

Frequency: once in two months

Free-of-control price

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2019



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

Signed for printing 23.12.2019. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 31,4.

Circulation 1000 copies. Order 105.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Использование современных ресурсосберегающих методов при изготовлении и ремонте деталей на примере электроискрового легирования (ЭИЛ)	8
<i>Иванов В. И., Денисов В. А., Игнатьков Д. А.</i>	
Исследования свойств электроискровых покрытий, полученных электродами из титановых электроэрозионных частиц	21
<i>Агеева Е. В., Латыпов Р. А., Новиков Е. П., Сабельников Б. Н.</i>	
Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры	34
<i>Гречухин А. Н., Куц В. В., Олещицкий А. В., Разумов М. С.</i>	
Демпфирующие резцы с варьированием жесткости	45
<i>Малыхин В.В., Яцун Е.И., Новиков С.Г.</i>	
Влияние способа получения высокоуглеродистой инструментальной стали У10А на физико-механические, технологические и коррозионные свойства	56
<i>Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Минаев И. В., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., Клементьев Д. С., Кругляков О.В.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Комплексное восстановление нормативного технического состояния керамзитобетонных панелей промышленных зданий, имеющих моральный и физический износ	77
<i>Дубраков С.В., Масалов А.В., Завалишин И.В.</i>	
Расчет осадки однородного основания	90
<i>Пахомова Е.Г., Куценко О.И., Морозова А.С., Тимохина А.Р.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Эффективность централизованного использования цифровых технологий, информационных ресурсов и средств защиты информации в органах власти на примере республики Тыва.....	99
<i>Донгак Б.С., Шатохин А.С., Мещеряков Р.В.</i>	
Настройка гиперпараметров искусственной нейронной сети для навигации мобильной платформы	115
<i>Дударенко Д. М., Смирнов П. А.</i>	
Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете	133
<i>Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Аль Манджи Х.Х.М., Яцун А.С., Карлов А.Е.</i>	
Методологические подходы к управлению региональной социально-экономической системой	148
<i>Аверченкова Е.Э.</i>	
Обобщенные теоретические модели киберфизических систем.....	161
<i>Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н.</i>	
Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета	176
<i>Яцун С.Ф., Аль Манджи Х.Х.М., Постольный А.А., Яцун А.С.</i>	
Программное обеспечение рационального выбора адаптивных технологий возделывания зерновых культур как элемент цифровизации земледелия.....	189
<i>Гостев А.В., Пыхтин А.И., Любичкий Н.И.</i>	
Алгоритмы функционирования магнито-метрической системы обеспечения поисково-спасательных операций с применением беспилотных летательных аппаратов	210
<i>Гуцевич Д.Е., Проскуряков Г.М., Слонов В. Н., Тетерин Д.П., Титенко Е.А., Фролов С.Н., Лисицин Л.А.</i>	
Модели и методика определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы	225
<i>Усина Е.Е., Шабанова А.Р., Лебедев И.В.</i>	
Исследование эффективности использования информационных технологий в системе управления техносферной безопасностью	241
<i>Попов В.М., Юшин В.В., Иорданова А.В., Трифонов А.П.</i>	
Оптимизация аналого-дискретных преобразований входного воздействия в подсистеме приемного канала информационно-измерительной системы	256
<i>Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Горяйнов Р. Ю.</i>	

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Use of Modern Resource-Saving Methods in Parts' Manufacturing and Repairing on the Example of Electric Spark Alloying (ESA)	8
<i>Ivanov V. I., Denisov V. A., Ignatkov D. A.</i>	
Study of Electric Spark Coatings Properties Obtained by Electrodes from Titanium Electroerosive Particles	21
<i>Ageeva E. V., Latypov R. A., Novikov E. P., Sabel'nikov B. N.</i>	
Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures	34
<i>Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S.</i>	
Damping Cutters with Varying Stiffness	45
<i>Malykhin V. V., Yatsun E. I., Novikov S. G.</i>	
Influence of the Method of Producing High-Carbon Tool Steel U10A on the Physical, Mechanical, Technological and Corrosion Properties	56
<i>Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Minaev I. V., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'yev D. S., Kruglyakov O. V.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Comprehensive Restoration of the Normative Technical Condition of Expanded Clay Concrete Panels of Industrial Buildings with Moral and Physical Wear	77
<i>Dobakov S. V., Masalov A. V., Zavalishin I. V.</i>	
Settlement Computation of Homogeneous Base	90
<i>Pakhomova E. G., Kutsenko O. I., Morozova A. S., Timokhina A. R.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

The effectiveness of the Centralized Use of Digital Technologies, Information Resources and Information Protection Tools in Government by the Example of the Republic of Tyva	99
<i>Dongak B. S., Shatokhin A. S., Mescheryakov R. V.</i>	
Setting Artificial Neural Network Hyperparameters for Mobile Platform Navigation	115
<i>Dudarenko D. M., Smirnov P. A.</i>	
Simulation of Controlled Motion of a Person When Walking in an Exoskeleton	133
<i>Yatsun S. F., Loktionova O. G., Postol'nyy A. A., Al' Mandzhi K. H. M., Yatsun A. S., Karlov A. E.</i>	
Methodological Approaches to Regional Socio-Economic System Management	148
<i>Averchenkova E. E.</i>	
Generalized Theoretical Models of Cyberphysical Systems	161
<i>Vatamaniuk I. V., Iakovlev R. N.</i>	
Modeling Gait Patterns of a Patient with Orthopedic Injury Using an Exoskeleton	176
<i>Yatsun S. F., Postol'nyy A. A., Al' Mandzhi K. H. M., Yatsun A. S.</i>	
Software of Rational Choice of Adaptive Technologies for the Cultivation of Grain Crops as an Element of Agriculture Digitalization	189
<i>Gostev A. V., Pykhtin A. I., Lyubitskiy N. I.</i>	
Algorithms for Functioning of the Magneto-Metric System to Provide Search and Rescue Operations Using Unmanned Flying Vehicles	210
<i>D. E. Gutsevich., Proskuryakov G. M., Slonov V. N., Teterin D. P., E. Titenko A., Frolov S. N., Lisitzin L. A.</i>	
Models and a Technique for Determining the Speech Activity of a User of a Socio-Cyberphysical System	225
<i>Usina E. E., Shabanova A. R., Lebedev I. V.</i>	
Study of the Effectiveness of the Application of Information Technology in the Technosphere Safety Management System	241
<i>Popov V. M., Yushin V. V., Iordanova A. V., Trifonov A. P.</i>	
Optimization of Analog-Discrete Conversions of the Input Action in the Subsystem of the Receiving Channel of the Information-Measuring System	256
<i>Burmaka A. A., T. Govorukhina. N., Goryainov R. Y.</i>	

Использование современных ресурсосберегающих методов при изготовлении и ремонте деталей на примере электроискрового легирования (ЭИЛ)

В. И. Иванов ¹ ✉, В. А. Денисов ¹, Д. А. Игнатьков ²

¹ ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² Белорусский государственный аграрный технический университет

проспект Независимости, 99, г. Минск, 220023, Республика Беларусь

✉ e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Резюме

Работа посвящена универсальному ресурсосберегающему методу обработки деталей – электроискровому легированию (ЭИЛ), используемому как при изготовлении, так и при ремонте деталей. Этот метод позволяет наносить упрочняющие и восстанавливающие покрытия на различные объекты (детали, инструменты, технологическую оснастку) независимо от их форм и размеров.

Цель исследования: примерами практического применения метода ЭИЛ показать высокую универсальность и эффективность его для решения задач машиностроительного и ремонтного производства.

Методы. Работа аналитическая, выполнена с учетом практического опыта авторов.

Результаты. Приведены краткие сведения о методе ЭИЛ, механизме формирования покрытий, их толщине и свойствах. При реализации упрочняющих технологий износостойкость повышается в 2-5 раз и более нанесением покрытий повышенной твердости с использованием электродов из металло-керамических твердых сплавов на основе карбидов TiC, WC и других твердых соединений. Показана целесообразность восстанавливающих ЭИ технологий: износ большинства деталей (около 85 %) агрегатов различной техники не превышает 200 мкм, а себестоимость восстановления их обычно составляет не более 25-30 % от стоимости новой детали; ресурс восстановленных деталей соизмерим или превышает ресурс новых деталей. Описаны на конкретных примерах упрочняющие и восстанавливающие технологии.

Заключение. Приведенные примеры практического применения метода ЭИЛ подтверждают положение о высокой универсальности и эффективности этого метода для решения задач машиностроительного и ремонтного производства. Полученные результаты могут быть использованы при выборе метода упрочнения или восстановления различных объектов из металлов и сплавов (детали машин, инструменты, технологическую оснастку) с учетом достоинств ЭИЛ.

Ключевые слова: электроискровое легирование; упрочнение; восстановление; деталь; покрытие; эффективность.

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

Для цитирования: Иванов В. И., Денисов В. А., Игнатков Д. А. Использование современных ресурсосберегающих методов при изготовлении и ремонте деталей на примере электроискрового легирования (ЭИЛ) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 8-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-8-20>.

Поступила в редакцию 07.10.2019

Подписана в печать 26.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Use of Modern Resource-Saving Methods in Parts' Manufacturing and Repairing on the Example of Electric Spark Alloying (ESA)

Valery I. Ivanov ¹ ✉, Vyacheslav A. Denisov ¹, Dmitry A. Ignatkov ²

¹ Federal State Budgetary Institution Scientific Center for Scientific and Applied Mathematics, VIM
1st Institutsky passage 5, Moscow 109428, Russian Federation

² Belarusian State Agrarian Technical University
Independence Avenue 99, Minsk 220023, Republic of Belarus

✉ e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Abstract

The work is devoted to a universal resource-saving method of parts processing - electric spark alloying (ESA). It is used both in manufacturing and repairing. This method allows you to apply reinforced and restored coatings to various objects (parts, tools, and tooling) regardless of their shapes and sizes.

Purpose of research is to show high universality and efficiency of ESA method on the examples of its practical application for problem solving of machine-building production and repair.

Methods. The work is analytical and carried out taking into account authors' practical experience.

Results. Some information about ESA method, coating forming mechanism, their thickness and properties is given. Implementing strengthening technologies wear resistance is increased by 2-5 times and more by coatings of increased hardness using electrodes from metal-ceramic hard alloys based on carbides of TiC, WC and other hard compounds. The expediency of recovery technologies is shown: wear of most parts (about 85%) of various techniques does not exceed 200 μm and their recovery cost is usually no more than 25-30% of a new part cost; recovered parts resource is commensurate or exceeds new parts resource. Adjusting and restoring technologies are described using specific examples.

Conclusion. Given examples of practical application of ESA method confirm high universality and efficiency of this method for solving machine-building and repair production problems. Obtained results can be used in method selecting for strengthening or reducing of various objects from metals and alloys (parts of machines, tools, technological equipment) taking into account ESA advantages.

Keywords: electric spark alloying; hardening; restoration; detail; covering, efficiency.

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

For citation: Ivanov V. I., Denisov V. A., Ignatkov D. A. Use of Modern Resource-Saving Methods in Parts' Manufacturing and Repairing on the Example of Electric Spark Alloying (ESA). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-8-20>.

Received 07.10.2019

Accepted 26.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Современное промышленное производство основано на использовании различной техники для выполнения операций технологического процесса при изготовлении деталей или их восстановлении. Увеличение срока службы этой техники, повышение ее надежности способствуют бесперебойности производственного процесса и сокращению его затрат. Уменьшение затрат на техническое обеспечение техники связано также с рациональным ремонтом ее и применением при этом эффективных методов восстановления размеров изношенных деталей. Также важным для потребителя является стоимость этой техники. Снижение ее может достигаться повышением эффективности машиностроительного производства, что в значительной степени зависит от качества инструментов, штампов и пресс-форм, используемых при изготовлении отдельных деталей.

В связи с указанным становятся особо востребованными универсальные ресурсосберегающие методы как для применения при изготовлении, так и при ремонте деталей. К таким методам с полным основанием можно отнести электроискровое легирование (ЭИЛ). Этот метод известен с 1940-х годов [1], за более чем 70-летний период накоплен большой практический опыт его применения, во многих технически развитых странах продолжают его ис-

следования в направлении совершенствования оборудования, технологий и электродных материалов [2-11].

Цель данной работы – примерами практического применения метода ЭИЛ показать высокую универсальность и эффективность его для решения задач машиностроительного и ремонтного производства.

Материалы и методы

Ниже приведены результаты аналитической работы, выполненной с учетом практического опыта авторов.

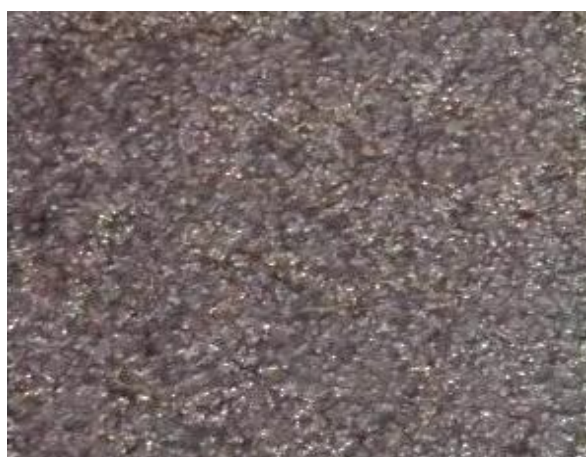
Результаты и их обсуждение

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) – развивает методы, направленные на увеличение ресурса и восстановление работоспособности деталей машин, рабочих органов и инструментов, включая ЭИЛ. Этот метод отличается высокой универсальностью и позволяет наносить упрочняющие и восстанавливающие покрытия на различные объекты (детали, инструменты, технологическую оснастку) независимо от их форм и размеров.

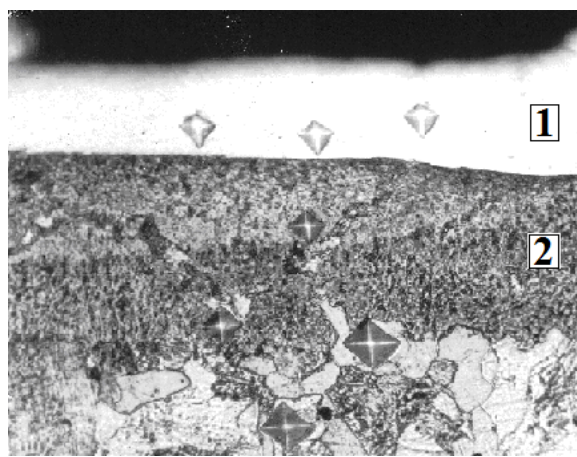
При использовании ЭИЛ токопроводящий материал детали подвергается многократному воздействию электрическими разрядами, параметры которых (энергия, длительность и частота) регулируются в широких пределах, соответ-

ственно, 0,01...10 Дж, 10...2000 мкс, 10...2000 Гц. При этом плотность мощности энергии в пятне достигает $10^6 \dots 10^9$ Вт/мм², что равно или превышает аналогичный показатель лазерного луча - $1 \cdot 10^6$ Вт/мм², а температура плазмы искрового разряда может достигать 20000 К [12]. При каждом разряде происходит полярный перенос элементов материала электрода – анода на деталь – катод, в качестве которых могут служить практически все токопроводящие материалы. В результате импульсного воздействия и микрометаллургических процессов поверхность материала детали приобретает новый характерный рельеф, образуется измененный поверхностный слой, состоящий из элементов

материала анода и катода, а также межэлектродной газовой среды. Толщина нанесенного слоя обычно составляет 5...1000 мкм, она зависит от электрических параметров процесса и материала электрода; использование технологического приема согласно [13] позволяет значительно, в 6-8 раз и более повысить толщину покрытия. Свойства нового слоя определяются материалом анода, поэтому нанесенные покрытия могут обладать улучшенными по отношению к исходному материалу детали свойствами – повышенными износо-, жаро-, коррозионной стойкостью и др. На рис. 1 приведены фотографии рельефа поверхности и измененного поверхностно слоя после обработки методом ЭИЛ.



а (1:1)



б (x480)

Рис. 1. Вид поверхности (а) и характерный вид структуры (б) измененного поверхностного слоя стали (1 – белый слой; 2 – переходный слой, ниже – основа) после ЭИЛ

Fig. 1. Type of surface (a) and characteristic type of structure (b) of the changed surface layer of steel (1 – white layer; 2 – transition layer, below - base) after ESA

Этот метод обладает рядом достоинств. Приведем некоторые из них: не требуется сложная предварительная подготовка поверхности детали – катода; достигается высокая прочность сцепле-

ния покрытия с основным металлом; отсутствуют перегрев детали и ее коробление в результате обработки; имеется возможность применения в качестве электродов практически всех токо-

проводящих материалов; стоимость оборудования относительно невысокая, оно обладает надежностью, ремонтно-пригодностью и мобильностью; метод отличается простотой и несложностью обучения приемам работы обслуживающего персонала.

Наряду с другими российскими и зарубежными научными центрами, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ выполняет исследования процесса ЭИЛ, кинетики формирования покрытий и их свойств, наноструктурирования поверхностных слоев, которые направлены на повышение эффективности метода ЭИЛ.

Приведем примеры эффективного применения метода ЭИЛ и технологические особенности обработки при решении разных задач.

Упрочняющие технологии направлены на увеличение износостойкости рабочих поверхностей деталей, рабочих органов типа ножей, а также режущих инструментов и штамповой оснастки для их изготовления. Износостойкость повышается в 2-5 раз и более. Эффект достигается нанесением покрытий повышенной твердости с использованием электродов из металлокерамических твердых сплавов на основе карбидов TiC, WC и других твердых соединений. Вместе с тем, дополнительная обработка нанесенного твердосплавного покрытия медным электродом способствует заметному улучшению положительного результата. Это эффективно в случаях, когда необходимо придать покрытию свойства теплопроводника для

рассеивания по рабочей поверхности тепла, образующегося при механической обработке металлических материалов. Наиболее эффективны упрочняющие технологии для увеличения износостойкости сложнопрофильного многолезвийного режущего инструмента, а также штамповой оснастки. Обычно после нанесения упрочняющих покрытий на детали машин выполняется последующая механическая обработка (шлифование, поверхностно-пластическое деформирование в виде алмазного выглаживания или обкатки роликом или шариком, притирка по сопряженной детали. Выполнение такой обработки после ЭИЛ рабочих органов, режущих инструментов и штампов не требуется.

На рис. 2 показаны некоторые объекты упрочняющей обработки методом ЭИЛ как для машиностроительного производства для агропромышленного комплекса (режущие инструменты, штампы), так и изделий этого производства (лапы культиватора, шестерни синхронизатора). Виден широкий диапазон применения упрочняющих электроискровых технологий для улучшения технического обеспечения промышленных предприятий.

Восстанавливающие ЭИ технологии позволяют вернуть для дальнейшего использования детали, утратившие в процессе эксплуатации размеры рабочих поверхностей или имеющие локальные дефекты. Это во многих случаях целесообразно, так как износ большинства деталей (около 85 %) агрегатов

различной техники, к примеру, применяемой в агропромышленном комплексе, не превышает 200 мкм, а себестоимость восстановления их обычно со-

ставляет не более 25-30 % от стоимости новой детали; ресурс восстановленных деталей соизмерим, а в некоторых случаях превышает ресурс новых деталей.

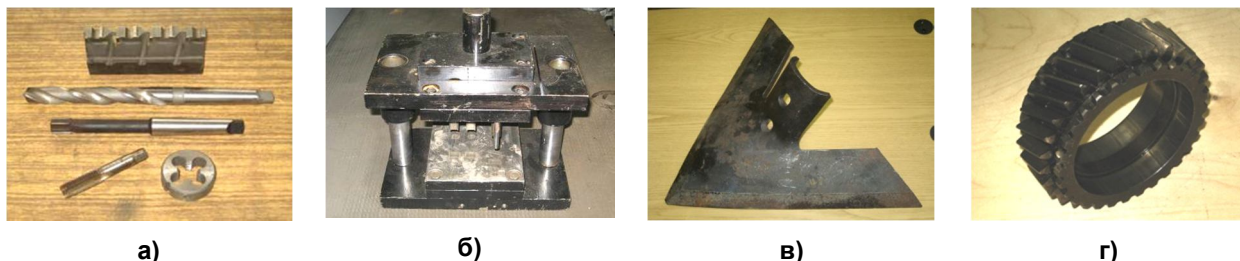


Рис. 2. Примеры объектов упрочнения: **а** – режущие инструменты; **б** – разделительный штамп; **в** – лапа культиватора; **г** – шестерня синхронизатора

Fig. 2. Examples of hardening objects: **a** – cutting tools; **b** – separation stamp; **v** – paw; cultivator; **r** – gear synchronizer

Поэтому восстановление изношенных деталей взамен приобретения новых способствует значительной экономии энергетических, материальных и трудовых ресурсов, снижает экологическую нагрузку на природную среду.

Метод ЭИЛ обладает достаточно большим технологическим диапазоном, что позволяет наносить покрытия раз-

ной толщины. На рис. 3 приведены в качестве примера предельные значения толщины покрытий разными электродными материалами, наносимыми на современной высоко универсальной установке «БИГ-5», что подтверждает возможность использования этого метода в ремонтных целях

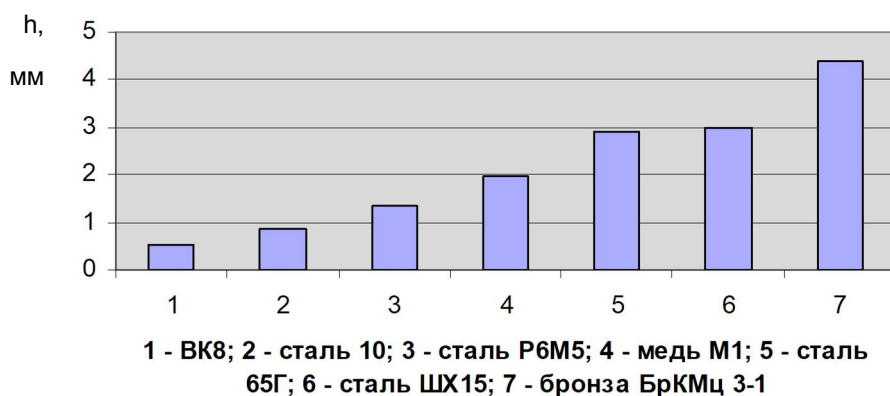


Рис. 3. Максимальная толщина покрытий на установке «БИГ-5» (на стали 45)

Fig. 3. Maximum thickness of coatings on the installation "BIG-5"(on steel 45)

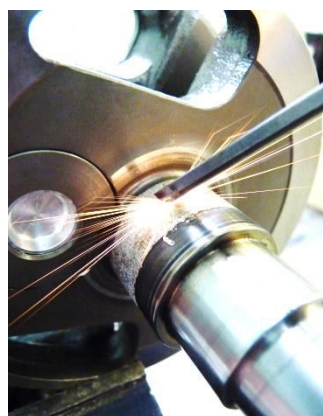
Выбор электродных материалов для нанесения покрытий выполняют с учетом условий работы упрочняемой или восстанавливаемой поверхности. При работе ее в неподвижном соединении

достаточно использования электродов из конструкционных сталей. Усложнение условий работы восстанавливаемой поверхности (трение скольжения, повышенные температуры, наличие агрес-

сивной среды) требует применения электродов из легированных сталей и сплавов, содержащих элементы, препятствующие воздействию агрессивных факторов: Cr, Ni, W, Mo, Si и другие. Электрические режимы обработки ме-

тодом ЭИЛ назначаются в зависимости от требуемой толщины покрытия.

Наибольшее применение метод ЭИЛ нашел при восстановлении наружных и внутренних посадочных поверхностей под подшипники валов, осей и корпусных деталей (рис. 4) [3].



а)



б)

Рис. 4. Нанесение покрытий на детали типа «вал» (а) и «корпус» (б)

Fig. 4. Coating on parts of the "shaft" type (a) and "housing" (b)

Установлено, что для обеспечения надежной работы на уровне 100 %-ного ресурса соединений «вал – подшипник» или «корпус – подшипник» достаточно опорной площади восстановленной поверхности не менее 55-60 %. Эффективность восстановления таких поверхностей иллюстрируют данные табл. 1 [14].

Особенность этих технологий заключается в нанесении на изношенные поверхности покрытий под номинальный размер или с минимальным припуском для последующей механической обработки. При отсутствии жестких требований по шероховатости поверхности последующая механическая обработка не выполняется.

Таблица 1. Сравнительные стоимостные данные по ряду изделий, тыс. руб.

Table 1. Comparative cost data for a number of products, thousand rubles

№ п/п	Наименование	Затраты		Экономия
		на приобретение	на восстановление	
1	Корпус коробки передач МТЗ-82	30,0	5,0	25,0
2	Полуось заднего моста МТЗ-82	6,0	2,0	4,0
3	Чулки одного ведущего моста КамАЗ	40,0	10,0	30,0
4	Опора промежуточная МТЗ-82	5,0	2,0	3,0

Наряду с указанным, на практике часто необходимо устранять на рабочих поверхностях деталей локальные дефекты, что также успешно решается применением метода ЭИЛ.

На рис. 5 приведен пример восстановления головки блока цилиндров дизельного двигателя DXi11 грузового автомобиля «ВОЛЬВО». В двигателе блок цилиндров и его головка наиболее нагружены, они подвергаются многократным термическим и динамическим нагрузкам, кроме того, это достаточно



а) б)

Рис. 5. Дефектная (а) и восстановленная (б) поверхность разъема головки блока цилиндров

Fig. 5. Defective (a) and reconditioned (b) surface of the cylinder head connector

Другими ответственными деталями являются гильзы цилиндров дизельных двигателей. У них часто встречаются дефекты в виде кольцевой выработки в верхней части (рис. 6а), глубина которой не превышает 150 мкм, и задиры зеркала. Нанесение ЭИ покрытия и последующее хонингование ручным инструментом не занимает более 30 минут, результат обработки виден на рис. 6б. По аналогичной технологии устраняются дефекты в виде задириков.

Вместе с тем, часто возникает необходимость восстановления ответственных деталей с большой выработ-

дорогие детали. После снятия головки с блока цилиндров оказалось, что вследствие неправильной эксплуатации на плоскости разъема этих деталей образовался свищ общей высотой более 3 мм (рис. 5а). Время полного восстановления головки и блока методом ЭИЛ составляло не более 3-х часов. При этом работа выполнена по месту, без снятия двигателя с машины, что значительно ускорило ремонт и снизило затраты на него. На рис. 5б показана восстановленная поверхность этой детали.



а) б)

Рис. 6. Изношенные (а) и восстановленные (б) гильзы цилиндров двигателя CAT-3116

Fig. 6. Worn (a) and restored (b) cylinder liners of the SAT-3116 engine

кой. Одними из многих примеров могут служить детали делительных устройств тестоделителей, износ которых неравномерен и достигает многих миллиметров. На рис. 7 приведен пример восстановления формы и размеров основания всасывающей камеры тестоделителя, износ которого в передней части составлял 8 мм. Восстановление методом ЭИЛ выполнено с применением технологического приема формирования толстослойных покрытий повышенной сплошности [13].

Приведенные данные свидетельствуют о высокой универсальности и

эффективности метода ЭИЛ. При этом отметим, что себестоимость нанесения ЭИ покрытий находится в пределах от 2 до 20 руб/см² в зависимости от технологии ЭИЛ, определяющей толщину, качество и свойства покрытий.

Благодаря своим положительным качествам и эффективности, метод ЭИЛ

по достоинству оценен и используется практически во всех технически развитых странах, многие из которых выпускают свои установки [15]. Они применяются как в единичном, так и крупносерийном производстве, как в ручном, так и в механизированном режимах, включая роботизированные комплексы (рис. 8).



а)



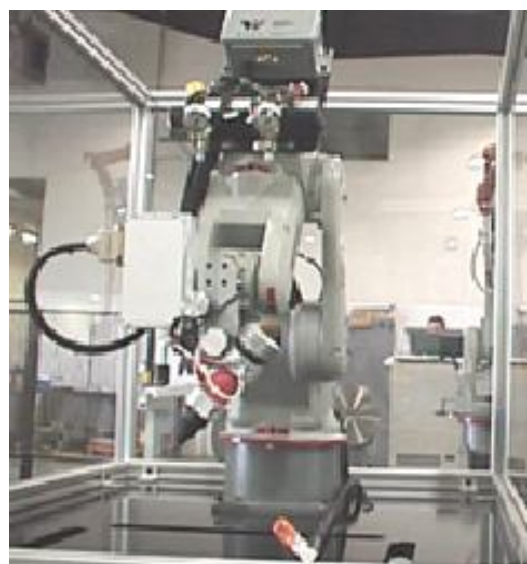
б)

Рис. 7. Основание всасывающей камеры тестоделителя «Benier 80-20» до восстановления, износ до 8 мм **(а)** и после восстановления **(б)** методом ЭИЛ

Fig. 7. The base of the suction chamber of the Benier 80-20 dough divider before recovery, wear up to 8 mm **(a)** and after recovery **(б)** by ESA



а)



б)

Рис. 8. Современное оборудование ЭИЛ: **а** – ручная установка «БИГ-4»; **б** – робототехнический комплекс ЭИЛ (США, фирма «ASAP»)

Fig. 8. Modern EIL equipment: **a** – manual installation "BIG-4"; **б** — EIL robotic system (USA, ASAP)

В отличие от многих других методов, он может эффективно использоваться автономно, вдали от систем электроснабжения и ремонтных баз, что особенно актуально в условиях отдаленных территорий.

Выводы

1. Приведенными примерами практического применения метода ЭИЛ под-

тверждается положение о высокой универсальности и эффективности этого метода для решения задач машиностроительного и ремонтного производства.

2. Метод ЭИЛ может быть особенно полезен в условиях отдаленности объектов ремонта от специализированных ремонтных баз.

Список литературы

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика электроискрового способа обработки материалов. М.: ЦБТИ МЭП, 1946.

2. Spadło S. Comparative studies of brush electrodischarge machining with electrodes of alloy steel and tungsten. *Advanced Manufacturing Systems and Technology*, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Courses and Lectures. Springer – Verlag Wien New York. 2002. № 437. P. 515-524.

3. Radek N., Bartkowiak K. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam // *Physics Procedia*. 2010. № 5. P. 417-423.

4. Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W., Yang G. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications // *J. Applied Surface Science*. 2011. № 257. P. 6364-6371.

5. Victor Verbitchi, Cristian Ciuca, Radu Cojocar. Electro-spark coating with special materials // *Nonconventional Technologies Review*. 2011. № 1. P. 57-62.

6. Xie Y.J., Wang M.C., Huang D.W. Comparative study of microstructural characteristic of electrospark and Nd: YAG laser epitaxially growing coatings // *J Applied Surface Science*. 2007. № 253(14). P. 6149–6156.

7. Ribalko A.V., Sahin O. The use of bipolar current pulses in electro spark alloying of metal surfaces // *Surface & Coatings Technology*. 2003. № 168. P. 129-135.

8. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 2005. 219 с.

9. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova T.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. Conditions for formation of MAX phase Cr_2AlC in electrospark coatings deposited onto titanium alloy // *Surface & Coatings Technology*. 2016. № 298. P. 15–23.

10. Михайлов В.В., Бачу К.А., Пасинковский Е.А., Перетятку П.В. К вопросу электроискрового легирования титана и его сплавов // *Электронная обработка материалов*. 2006. № 3. С. 106–111.
11. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин, В.И. Иванов, С.А. Величко, П.А. Ионов. Саранск, 2003. 504 с.
12. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин [и др.]. Саранск, 2003. 504 с.
13. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х., Денисов В.А. Электроискровой способ нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности / Евразийский патент № 017066, опубл. 28.09.2012. Бюллетень ЕАПВ «Изобретения (евразийские заявки и патенты)». № 9. 2012.
14. Гвоздев А.А., Иванов В.И., Костюков А.Ю. О развитии опыта восстановления неподвижных соединений нанесением электроискровых покрытий // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2017. № 12. С. 9-12.
15. Иванов В.И. Электроискровые технологии и оборудование в России и за рубежом // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2017. № 5. С. 41-54.

References

1. Lazarenko B.R., Lazarenko N.I. *Fizika elektroiskrovogo sposoba obrabotki materialov* [Physics of the electrospark method of processing materials]. Moscow, 1946 (In Russ.).
2. Spadło S. Comparative studies of brush electrodischarge machining with electrodes of alloy steel and tungsten. *Advanced Manufacturing Systems and Technology, International Center for Mechanical Sciences (CISM), Courses and Lectures*. Springer. *Verlag Wien New York*, 2002, no.437, pp. 515-524.
3. Radek N., Bartkowiak K. Performance properties of electrospark deposited by carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*. 2010, no. 5, pp. 417-423.
4. Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W., Yang G. Electrospark alloying using graphite electrode on a titanium alloy surface for biomedical applications. *J. Applied Surface Science*, 2011, no.257, pp. 6364-6371.
5. Victor Verbitchi, Cristian Ciuca, Radu Cojocar. Electro-spark coating with special materials. *Nonconventional Technologies Review*, 2011, no.1, pp. 57-62.

6. Xie Y.J., Wang M.C., Huang D.W. Comparative study of microstructural characteristics of electrospark and Nd: YAG laser epitaxially growing coatings. *J Applied Surface Science*, 2007, no. 253 (14), pp. 6149-6156.
7. Ribalko A.V., Sahin O. The use of bipolar current pulses in electro spark alloying of metal surfaces. *Surface & Coatings Technology*, 2003, no. 168, pp. 129-135.
8. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D. *Novye elektrodnye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya* [New electrode materials for electrospark alloying]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2005, 219 p. (In Russ.).
9. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova TA, Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. Conditions for the formation of MAX phase Cr₂AlC in electrospark coatings deposited onto titanium alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2016, no. 298, pp. 15-23.
10. Mikhailov V.V., Bachu K.A., Pasinkovsky E.A., Peretyatku P.V. K voprosu elektroiskrovogo legirovaniya titana i ego splavov [On the issue of electrospark doping of titanium and its alloys]. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic material processing*, 2006, no. 3, pp. 106-111 (In Russ.).
11. Burumkulov F.H., Lezin P.P., Senin P.V., Ivanov V.I., Velichko S.A., Ionov P.A. *Elektroiskrovyye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin i instrumentov (teoriya i praktika)* [Electrospark technologies for the restoration and hardening of machine parts and tools (theory and practice)]. Saransk, 2003, 504 p. (In Russ.).
12. Ogareva N.P., Burumkulov F.H., Lezin P.P., Senin P.V. *Elektroiskrovyye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin i instrumentov (teoriya i praktika)* [Electrospark technology for restoration and hardening of machine parts and tools (theory and practice)]. Saransk, 2003, 504 p. (In Russ.).
13. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh., Denisov V.A. Elektroiskrovoy sposob naneseniya tolstosloinykh pokrytii povyshennoi sploshnosti [Electrospark method for applying thick-layer coatings of increased continuity]. Eurasian patent No. 017066, publ. 09/28/2012. EAPO Bulletin "Inventions (Eurasian Applications and Patents)", no. 9, 2012 (In Russ.).
14. Gvozdev A.A., Ivanov V.I., Kostyukov A.Yu. O razvitii opyta vosstanovleniya nepodviznykh soedinenii naneseniem elektroiskrovyykh pokrytii [On the development of the experience of restoring fixed joints by applying electrospark coatings]. *Remont, vostanovlenie, modernizatsiya = Repair, restoration, modernization*, 2017, no. 12, pp. 9-12 (In Russ.).

15. Ivanov V.I. Elektroiskrovye tekhnologii i oborudovanie v Rossii i za rubezhom [Electrospark technologies and equipment in Russia and abroad]. *Sel'skokhozyaistvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* = *Agricultural machinery: maintenance and repair*, 2017, no. 5, pp. 41-54 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Иванов Валерий Игоревич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Электроискровые и термодиффузионные процессы», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Valery I. Ivanov, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Electrospark and Thermal Diffusion Processes, Federal State Budgetary Institution Scientific Center for Scientific and Applied Mathematics, VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Денисов Вячеслав Александрович, доктор технических наук, руководитель направления ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: va.denisov@mail.ru

Vyacheslav A. Denisov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of Department, Federal State Budgetary Institution of Higher Vocational Education and Science VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: va.denisov@mail.ru

Игнатьков Дмитрий Андреевич, доктор технических наук, профессор, БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: d.ignatkov@mail.ru

Dmitry A. Ignatkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, BSATU, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: d.ignatkov@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-21-33>

Исследования свойств электроискровых покрытий, полученных электродами из титановых электроэрозионных частиц

Е. В. Агеева¹ ✉, Р. А. Латыпов², Е. П. Новиков¹, Б. Н. Сабельников¹

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

² ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»
ул. Большая Семеновская, д. 38, г. Москва, 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Современный автомобиль является очень сложной системой, включающей в себя порядка 15...20 тыс. деталей, причем более 7 тысяч теряют свои первоначальные характеристики в процессе эксплуатации. Как показывает практика, более 4000 деталей автомобиля утрачивают свою работоспособность значительно раньше истечения срока эксплуатации автотранспортного средства в целом. Наличие этих факторов приводит к значительным затратам на ремонт, а так же к потерям прибыли, вызванным длительными простоями части подвижного состава. Рост эффективности и качественное совершенствование различных областей общественного производства ставят новые и более сложные задачи по повышению работоспособности и надежности деталей. Эти задачи могут быть решены как за счет создания специальных инновационных материалов, так и развития и внедрения в производство новейших методов упрочнения автомобильных деталей и нанесения на них защитных покрытий. Электроискровое легирование металлических поверхностей является одним из этих методов. Электроискровое легирование получило широкое распространение в большинстве видов промышленности, в том числе в автомобильном производстве, машиностроении и металлообработке. Метод электроискрового легирования позволяет обеспечить высокую степень адгезии, высокий КПД и низкий расход энергии. Наибольший интерес представляют электроды с наноразмерными частицами. Наиболее перспективным методом является электроэрозионное диспергирование, направленное на получение наноразмерных материалов. Целью настоящей работы являлось изучение свойств покрытий, полученных методом электроискрового легирования с использованием порошковых электродов, изготовленных из электроэрозионных частиц, полученных в воде дистиллированной из отходов титанового сплава марки ВТ6.

Методы. Для получения титанового порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали стружку марки ВТ6. Консолидация частиц, полученных электроэрозионным диспергированием отходов титанового сплава марки ВТ6, выполнена по методу искрового плазменного спекания с использованием системы искрового плазменного спекания SPS 25-10. Для нанесения электроискровых покрытий применялась установка «UR-121». С целью изучения формы и морфологии покрытий, полученных экспериментальным путем, были сделаны снимки на растровом (сканирующем) электронном микроскопе QUANTA 600 FEG. Рентгеноспектральный анализ выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG. Шероховатость поверхности образцов исследовали на профилометре SURTRONIC 25.

Результаты. В результате исследования свойств порошковых электродов из электроэрозионных частиц и покрытий, полученных методом электроискрового легирования, экспериментально установлено, что основными элементами в спеченном образце из титановых частиц, полученных в воде дистил-

лированной, являются титан, кислород, алюминий и вольфрам. Остальные элементы присутствуют в незначительных количествах. Установлено, что шероховатость образцов с электроискровым покрытием составляет $Rz\ 13,2\ \text{мкм}$ ($Ra\ 2,14\ \text{мкм}$). Соответственно данные частицы, полученные в воде дистиллированной из отходов титанового сплава марки ВТ6, можно использовать для изготовления электродов, пригодных для восстановления автомобильных деталей методом электроискрового легирования.

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

Ключевые слова: отходы титанового сплава; электроэрозионное диспергирование; порошок; искровое плазменное спекание; электрод; электроискровое легирование; элементный состав; коэффициент трения.

Конфликт интересов: Авторы декларируют 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: Исследования свойств электроискровых покрытий, полученных электродами из титановых электроэрозионных частиц / Е. В. Агеева, Р. А. Латыпов, Е. П. Новиков, Б. Н. Сабельников // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 21-33. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-21-33>.

Поступила в редакцию 10.09.2019

Подписана в печать 30.10.2019

Опубликована 23.12.2019

Study of Electric Spark Coatings Properties Obtained by Electrodes from Titanium Electroerosive Particles

Ekaterina V. Ageeva ¹ ✉, Rashit A. Latypov ², Evgeny P. Novikov ¹,
Boris N. Sabel'nikov ¹

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

² Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Modern car is a very complex system which has about 15... 20 thousand parts. More than 7 thousand lose their initial characteristics during operational process. As practice shows, more than 4000 car parts lose their operability much earlier than the expiration of vehicle life as a whole. These factors lead to significant repair costs, as well as profit losses caused by long delays in part of the rolling stock. Efficiency and qualitative improvement growth of various areas of public production pose new and more complex tasks to increase the efficiency and reliability of parts. These tasks can be solved both by creating special innovative materials and by developing and introducing into production the latest methods of car parts strengthening and applying protective coatings. Electric spark alloying of metal surfaces is one of these methods. Electric spark alloying is widespread in most industries, including automotive manufacturing, mechanical engineering and metalworking. Electric spark alloying method provides high degree of adhesion, high efficiency and low energy consumption. Electrodes with nano particles are of greatest interest. The most promising method is electroerosive dispersion used in the production of nano materials. The purpose of the work is to study coatings' properties obtained by electric spark alloying using powder electrodes made from electroerosive particles obtained in distilled water from titanium alloy wastes of grade BT6.

Methods. BT6 grade chips were used to prepare titanium powder by electroerosive dispersion. Consolidation of the particles received by electroerosive dispersion of BT6 titan alloy waste is done by spark plasma agglomeration

method with the use of spark plasma agglomeration system of SPS 25-10. UR-121 installation was used to cover electrospark coverings. Experimental pictures on QUANTA 600 FEG raster (scanning) electronic microscope were made to study coverings' form and morphology. X-ray spectrum analysis was performed by EDAX 's energy dispersion X-ray analyzer built into QUANTA 600 FEG raster electron microscope. Surface roughness of samples was examined on SURTRONIC 25 profilometer.

Results. *It was experimentally stated that titanium, oxygen, aluminium and tungsten are the main elements in the sintered sample of titanium particles obtained in distilled water. It was stated as a result of properties investigation of powder electrodes from electroerosive particles and coatings obtained by electrospark alloying. Other elements are present in minor amounts. Roughness of electric spark coated samples is Rz 13.2 μm (Ra 2.14 μm). These particles obtained in water distilled from BT6 titanium alloy waste can be used for electrodes suitable for automotive parts recovering by electric spark alloying.*

Conclusion. *Obtained results can be used in creation of resource-saving processes of metal alloys and composite materials.*

Keywords: titanium alloy wastes; electroerosive dispersion; powder; spark plasma agglomeration; electrode; electrospark alloying; element structure; friction coefficient.

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

Funding: *The study was carried out with RFBR support in scientific project No. 19-38-50065.*

For citation: Ageeva E. V., Latypov R. A., Novikov E. P., Sabel'nikov B. N. Study of Electric Spark Coatings Properties Obtained by Electrodes from Titanium Electroerosive Particles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 21-33 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-21-33>.

Received 19.09.2019

Accepted 30.10.2019

Published 23.12.2019

Введение

Современный автомобиль является очень сложной системой, включающей в себя порядка 15...20 тыс. деталей, причем более 7 тысяч теряют свои первоначальные характеристики в процессе эксплуатации. Как показывает практика, более 4000 деталей автомобиля утрачивают свою работоспособность значительно раньше истечения срока эксплуатации автотранспортного средства в целом. Наличие этих факторов приводит к значительным затратам на ремонт, а так же к потерям прибыли, вызванными длительными простоями части подвижного состава [1].

В ходе проведения исследования было выявлено, что для более чем 70% изношенных деталей автомобилей, целесообразно было бы проводить работы по восстановлению с целью их повторного использования. Что касается затрат на данный вид работы с изношенными деталями, то в подавляющем большинстве случаев эти показатели не превышают и 30% от стоимости новых деталей, а при условии квалифицированного выбора технологии для восстановления становится возможным достижение ресурса, равного ресурсу новой детали [2-5].

Рост эффективности и качественное совершенствование различных областей

производства ставят новые и более сложные задачи по повышению работоспособности и надежности деталей. Эти задачи могут быть решены как за счет создания специальных инновационных материалов, так и развития и внедрения в производство новейших методов упрочнения автомобильных деталей и нанесения на них защитных покрытий.

Для упрочнения и нанесения защитных покрытий весьма перспективным является метод электроискрового легирования металлических поверхностей [6-8].

Электроискровое легирование получило широкое распространение в большинстве видов промышленности, в том числе в автомобильном производстве, машиностроении и металлообработке. Метод электроискрового легирования позволяет обеспечить высокую степень адгезии, высокий КПД и низкий расход энергии.

Наибольший интерес представляют электроды с наноразмерными частицами. Наиболее перспективным методом является электроэрозионное диспергирование, направленное на получение наноразмерных материалов.

Целью настоящей работы являлось исследование свойств покрытий, полученных методом электроискрового легирования с использованием электродов, изготовленных из электроэрозионных порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования титановых сплавов марки ВТ6.

Материалы и методы

Одним из перспективных методов получения порошковых материалов, пригодных для изготовления электродов практически из любого токопроводящего материала, является метод электроэрозионного диспергирования [9-13].

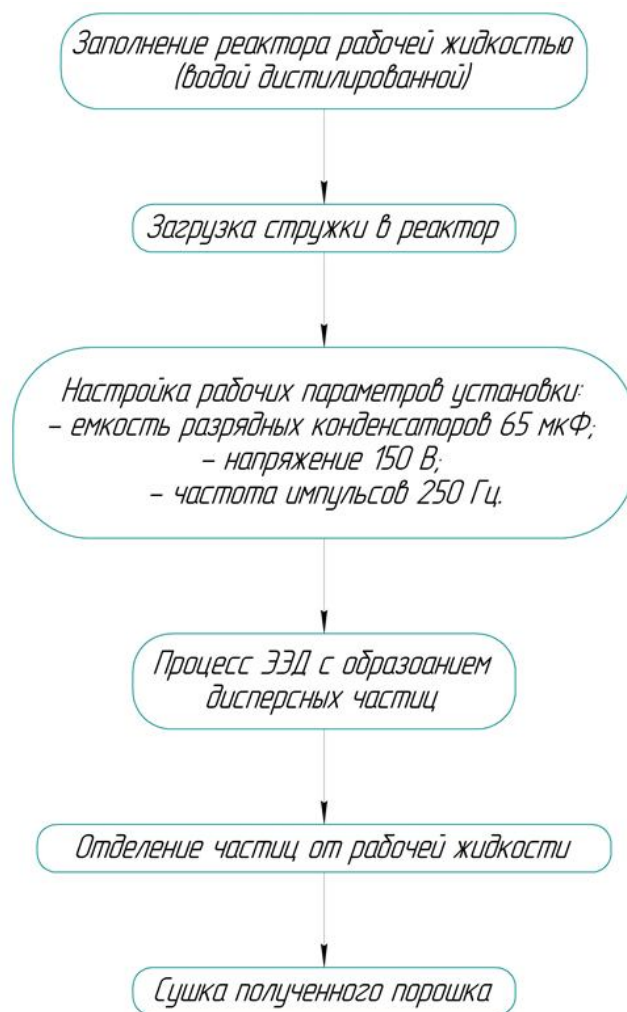
Для получения титанового порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали стружку марки ВТ6. Блок-схема получения порошка методом ЭЭД представлена на рис. 1.

Консолидация частиц, полученных электроэрозионным диспергированием отходов титанового сплава марки ВТ6, выполнена по методу искрового плазменного спекания с использованием системы искрового плазменного спекания SPS 25-10 (Thermal Technology, США) по схеме, представленной на рис. 2. На рис.3. представлена блок-схема процесса искрового плазменного спекания частиц.

Для нанесения электроискровых покрытий применялась установка «UR-121», представленная на рис. 4.

Процесс нанесения ЭИЛ покрытия занимает 30 ... 60 секунд на 10 мм² в зависимости от электродного материала и материала восстанавливаемой детали, что приводит к увеличению срока службы от 1,5 раз и более.

Разработанные электроды из титанового сплава предлагается использовать с целью восстановления деталей типа «вал».

**Рис.1.** Блок-схема получения порошка методом ЭЗД**Fig. 1.** EED powder flow chart

К основным дефектам деталей подобного типа относятся износ рабочей поверхности в сопряжениях вал – подшипник скольжения; царапины, задиры, риски, а также другие локальные дефекты. В процессе разработки технологического процесса были отработаны режимы и технологические приемы операций нанесения восстановительных покрытий методами ЭИЛ, режимы механической обработки и упрочнения.

После нанесения покрытия были проведены исследования коэффициента

трения. По их результатам было установлено, что при использовании в качестве контртела (шарика) стали марки «Stainless Steel AISI 420» на соответствующем пути трения происходит следующее:

- 100 м – налипание продуктов изнашивания образца на контртело;
- 200 м – налипание продуктов изнашивания образца на контртело;
- 500 м – частичный износ контртела и налипание продуктов изнашивания образца на контртело.

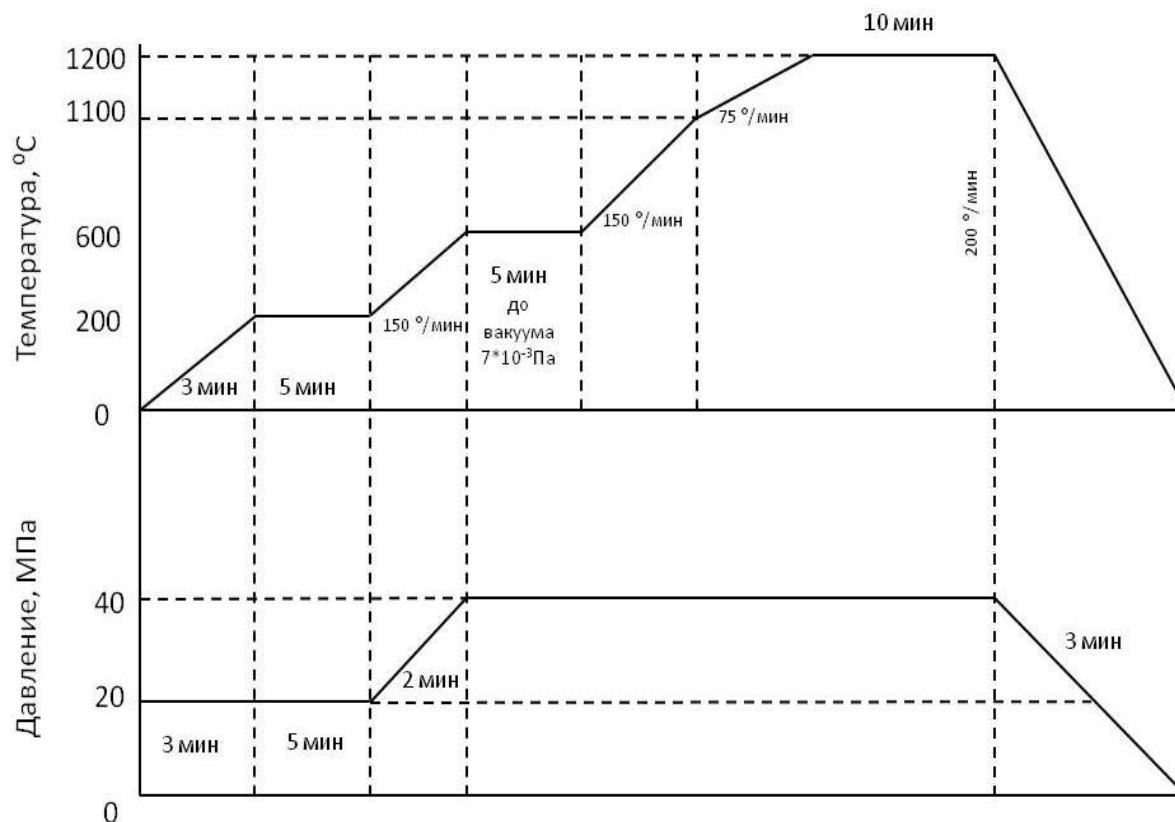


Рис. 2. Консолидация порошков методом искрового плазменного спекания (схема)

Fig. 2. Consolidation of powders by spark plasma sintering (scheme)

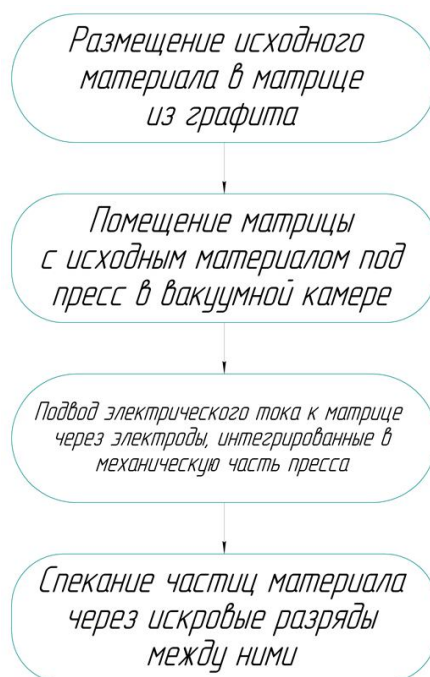


Рис. 3. Блок-схема процесса искрового плазменного спекания частиц

Fig. 3. The block diagram of the process of spark plasma sintering of particles



Технические характеристики установки «UR-121»:
 Энергопотребление – 0,11 кПа;
 Напряжение 22 В;
 Возможная толщина нанесенного покрытия 10...30 мкм;
 Глубина диффузионного слоя до 50 мкм;
 Расход одного применяемого электрода 400...800 см² в зависимости от марки электрода

Рис. 4. Установка для электроискровой обработки «UR-121»

Fig. 4. Installation for electric spark processing «UR-121»

С целью изучения формы и морфологии покрытий, полученных экспериментальным путем, были сделаны снимки на растровом (сканирующем) электронном микроскопе QUANTA 600 FEG.

Рентгеноспектральный анализ электроискровых покрытий проведен с применением энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG.

Результаты и их обсуждение

Результаты микроскопии и микроанализа покрытия, полученного методом электроискрового легирования из порошковых электродов, изготовленных из частиц, полученных методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной, представлены на рис. 5, 6 и в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав образца

Table 1. Elemental composition of the sample

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
Si	1,11	2,27
Al	5,39	3,22
O	25,89	28,59
Fe	0,72	0,74
Ti	63,19	61,56
W	3,69	3,61
Итого:	100,00	100,00

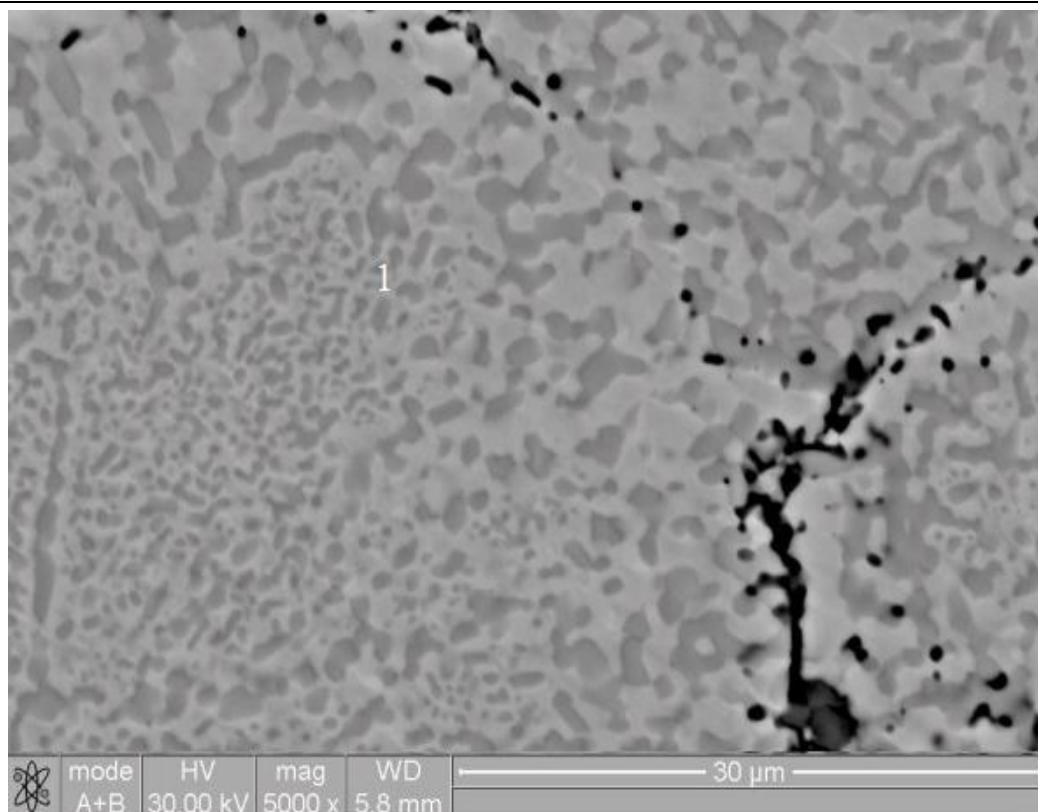


Рис. 5. Микроструктура электрода из титанового порошка

Fig. 5. Micro structure of titanium powde relectrode

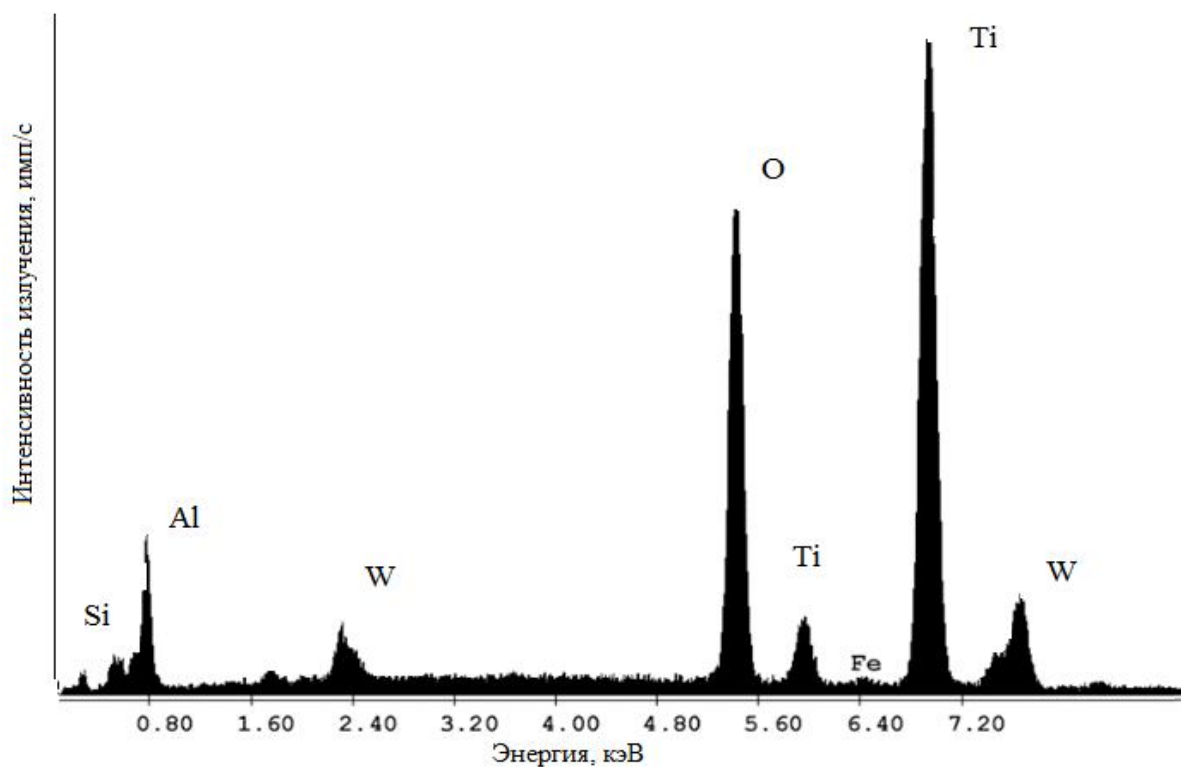


Рис. 6. РСМА электрода из электроэрозионного порошка

Fig. 6. RSMA electrode of the EDM powder

Установлено, что основными элементами покрытий, полученных методом электроискрового легирования, являются титан, кислород, алюминий и вольфрам. Остальные элементы присутствуют в незначительных количествах.

Результаты исследования шероховатости поверхности образцов представлены на рис. 7.

Экспериментально установлено, что шероховатость образцов с электроискровым покрытием составляет R_z 13,2 мкм (R_a 2,14 мкм).

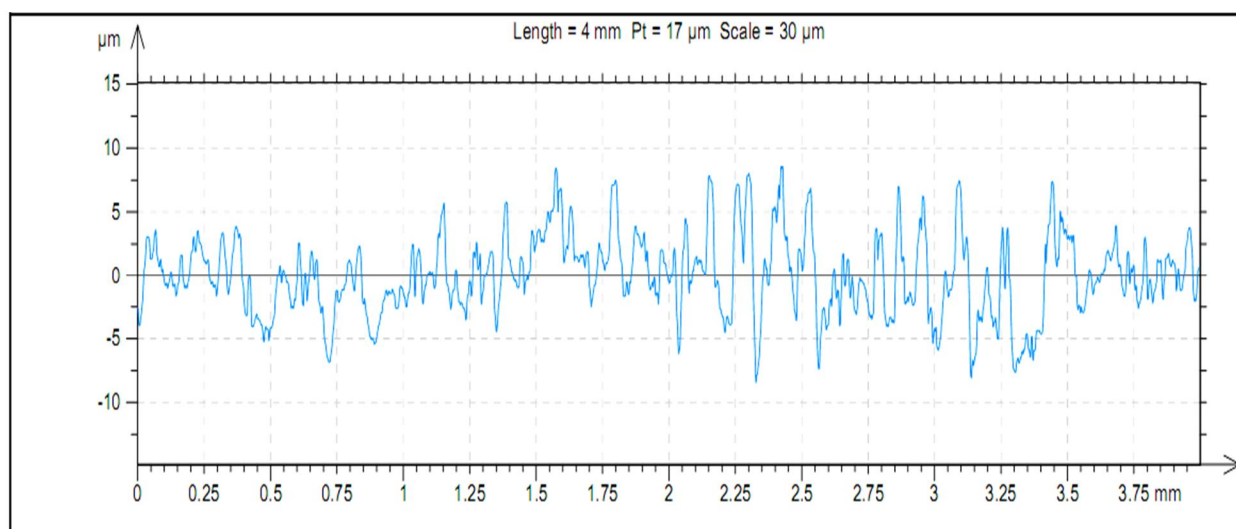


Рис. 7. Шероховатость поверхности образца («SURTRONIC 25»)

Fig. 7. Sample surface roughness ("SURTRONIC 25")

Выводы

1. В результате исследования свойств порошковых электродов из электроэрозионных частиц и покрытий, полученных методом электроискрового легирования, экспериментально установлено, что основными элементами в спеченном образце из титановых частиц, полученных в воде дистиллированной, являются титан, кислород, алюминий и вольфрам. Остальные элементы присутствуют в незначительных количествах.

2. Установлено, что шероховатость образцов с электроискровым покрытием составляет R_z 13,2 мкм (R_a 2,14 мкм). Соответственно данные частицы, полученные в воде дистиллированной из отходов титанового сплава марки ВТ6, можно использовать для изготовления электродов, пригодных для восстановления автомобильных деталей методом электроискрового легирования.

Список литературы

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

2. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Электроискровое легирование // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2010. № 4 (52). С. 30-32.
3. Сафонов С.В., Смоленцев В.П., Грицюк В.Г. Электроискровое легирование и покрытие металлических изделий // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 11 (212). С. 13-19.
4. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д., Власенко В.Д. Электроискровое легирование поверхностей титановых сплавов // Перспективные материалы. 2006. № 1. С. 79-85.
5. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование твердосплавным электродом в условиях применения нетрадиционных электрических параметров импульса обобщение результатов // Металлообработка. 2005. № 3 (27). С. 21-28.
6. Астапов И.А., Верхотуров А.Д., Козырь А.В. Электроискровое легирование сплава ВК8 карбидами переходных металлов IV-VI групп и металлокерамикой на основе карбида титана // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки. 2009. № 3. С. 64-69.
7. Логинов П.К., Ретюнский О.Ю. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 217 с.
8. Новиков А.Н., Стратулат М.П., Севостьянов А.Л. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей. Орел: ОрелГТУ, 2006. 332 с.
9. Агеева Е.В., Новиков Е.П., Агеев Е.В. Рентгеноструктурный анализ алюминиевого электроэрозионного порошка, полученного в дистиллированной воде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. №5 (68). С. 8-13.
10. Ageeva E.V., Ageev E.V., Osminina A.S. Properties and characterizations of powders produced from waste carbides // Журнал нано- и электронной физики. 2013. Т. 5. № 4. С. 04038-1-04038-2.
11. Новиков Е.П. Методы переработки алюминиевых отходов автомобильного производства // Будущее науки – 2015: сб. науч. статей 3-й Межд. науч.-практ. конф.: в 2 т. Курск: ЮЗГУ, 2015. Т. 2. С. 287–293.
12. Новиков Е.П., Агеев Е.В. Исследование гранулометрического состава алюминиевого порошка // Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. Курск, 2015. С. 252–256.
13. Порошковые композиционные электроэрозионные материалы: получение и свойства: монография / А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, А.В. Щербаков, Е.П. Новиков. Курск, 2016. 146 с.
14. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19-22.

15. Пат. 2612117 Российская Федерация, МПК В22F 9/14, С22В 7/00, С22В 21/00, В82У 30/00. Способ получения алюминиевого нанопорошка / Агеев Е. В., Новиков Е.П., Агеева Е. В.; заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. № 2015144702; заявл. 19.10.2015; опубл. 02.03.2017, Бюл. № 17.

16. Пат. 2631549 Российская Федерация, МПК В22F 9/14, С22В 34/12, В23Н 1/00. Способ получения порошка титана методом электроэрозионного диспергирования / Новиков Е.П., Агеев Е.В., Агеева Е.В.; Заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т, № 2016110017; заявл. 11.11.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 27.

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

References

1. Polyanskov YU.V., Tamarov A.P. Elektroiskrovое legirovanie i posleduyushchaya lazernaya obrabotka instrumenta iz bystrorezhushchih stalej [Electric Spark alloying and subsequent laser processing of high-speed steel tools]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ulyanovsk state technical University*. 1998, no. 2 (3), pp. 49-54 (In Russ.).

2. Ivanov V.I., Burumkulov F.H. Elektroiskrovое legirovanie [Electro-Spark doping]. *Remont. Innovacii. Tekhnologii. Modernizaciya = Repair. Innovations. Technologies. Modernization*. 2010, № 4 (52), pp. 30-32 (In Russ.).

3. Safonov S.V., Smolencev V.P., Gricyuk V.G. Elektroiskrovое legirovanie i pokrytie metallicheskih izdelij [Electric Spark alloying and coating of metal products]. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem = Reference Book. Engineering magazine with app*, 2014, no. 11 (212), pp. 13-19 (In Russ.).

4. Mulin Yu.I., Verhoturov A.D., Vlasenko V.D. Elektroiskrovое legirovanie poverhnostej titanovykh splavov [Electroscopic alloying of surfaces of titanium alloys]. *Perspektivnye materialy = Perspective materials*, 2006, no. 1, pp. 79-85 (In Russ.).

5. Rybalko A.V., Siminel A.V., Sahin O. Elektroiskrovое legirovanie tverdosplavnym elektrodom v usloviyah primeneniya netradicionnykh elektricheskikh parametrov impul'sa obobshchenie rezul'tatov [Electric Spark alloying with a solid-alloy electrode under conditions of using non-traditional electrical pulse parameters generalization of results]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2005, no. 3 (27), pp. 21-28 (In Russ.).

6. Astapov I.A., Verhoturov A.D., Kozyr' A.V. Elektroiskrovое legirovanie splava VK8 karbidami perekhodnykh metallov IV-VI grupp i metallokeramikoj na osnove karbida titana [8 carbides of transition metals of groups IV-VI and cermets based on titanium carbide]. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Vestnik pomorskogo universiteta. Series: Natural Sciences*, 2009, no. 3, pp. 64-69 (In Russ.).

7. Loginov P.K., Retyunskij O.Yu. Sposoby i tekhnologicheskie processy vostanovleniya iznoshennykh detalej [Methods and technological processes for restoring worn parts]. Tomsk, *Tomskij politekhnicheskij universitet = Tomsk Polytechnic University Publ.*, 2010, 217 p. (In Russ.).
8. Novikov A.N., Stratulat M.P., Sevost'yanov A.L. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej avtomobilej [Restoration and strengthening of car parts]. Orel, *OrelGTU Publ.*, 2006, 332 p. (In Russ.).
9. Ageeva E.V., Novikov E.P., Ageev E.V. Rentgenostrukturnyj analiz alyuminievogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v distillirovannoj vode [X-ray refraction of electroerosion aluminum powder produced in distilled water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2016, no. 5 (68), pp. 8-13 (In Russ.).
10. Ageeva E.V., Ageev E.V., Osminina A.S. Properties and characterizations of powders produced from waste carbides. *Zhurnal nano- i elektronnoj fiziki = Journal of nano-and electronic physics*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 04038-1-04038-2.
11. Novikov E.P. [Methods of processing aluminum waste of automobile production]. *Budushchee nauki – 2015. Sb. nauch. statej 3-j Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Future of science-2015. Collection nauch. articles of the 3rd Intern. science]. Kursk, 2015, vol. 2, pp. 287–293 (In Russ.).
12. Novikov E.P., Ageev E.V. [Study of the granulometric composition of aluminum powder]. *Innovacii v metalloobrabotke: vzglyad molodykh specialistov. Sb. nauch. tr. Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Innovations in Metalworking: a view of young professionals. Collection of scientific works. tr. Intl. science.- yeah]. Kursk, 2015, pp. 252–256 (In Russ.).
13. Altuhov A.Yu., Ageeva E.V., Kruglyakov O.V., Shcherbakov A.V., Novikov E.P. *Poroshkovye kompozicionnye elektroerozionnye materialy: poluchenie i svoystva* [Electroerosive Powder composite materials: preparation and properties]. Kursk, 2016, 146 p. (In Russ.).
14. Latypov R.A., Ageev E.V., Ageeva E.V., Novikov E.P. Issledovanie alyuminievogo poroshka, poluchennogo metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya v distillirovannoj vode [Investigation of aluminum powder obtained by electroerosive dispersion in distilled water]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravocnik = All materials. Encyclopedic reference book*, 2016, no. 4, pp. 19-22 (In Russ.).
15. Ageev E. V., Novikov E.P., Ageeva E. V. Sposob polucheniya alyuminievogo nanoporoshka [Method for producing aluminum nanopowder]: Patent 2612117 RF MPK B22F 9/14, C22B 7/00, C22B 21/00, B82Y 30/00. *zayavitel' i patentoobladatel' YugoZap. gos. unt. № 2015144702; zayavl. 19.10.2015; opubl. 02.03.2017, Byul. № 17* (In Russ.).
16. Novikov E.P., Ageev E.V., Ageeva E.V. Sposob polucheniya poroshka titana metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya [A method for obtaining titanium powder by

electroerosion dispersion]: Patent 2631549 RF, MPK B22F 9/14, C22B 34/12, B23H 1/00 . applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University. 25.09.2017 (In Russ.).

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

Информация об авторах / Information about the Authors

Агеева Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Ekaterina V. Ageeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail :ageev-ev@yandex.ru

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

Rashit A. Latypov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Equipment and technology of welding production, Moscow Polytechnic University. Moscow, Russian Federation, e-mail: latipov46@mail.ru

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

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

Сабельников Борис Николаевич, аспирант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru

Boris N. Sabel'nikov, Post-Graduate Student, Department of Automobiles and Automotive Economy, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail:sabelnikovboris1@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>



Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры

А. Н. Гречухин¹ ✉, В. В. Куц¹, А. В. Олешицкий¹, М. С. Разумов¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В исследовании рассмотрены вопросы повышения точности аддитивных методов формообразования изделий. Проведен анализ, предложена новая конструкция устройства для формообразования изделий аддитивными методами на базе механизмов параллельно-последовательной структуры, которая обеспечивает жесткость технологической системы, повышенную точность позиционирования конечного элемента формообразующей системы, расширяя, таким образом, технологические возможности аддитивного формообразования.

Методы. Формообразование поверхностей деталей аддитивными методами характеризуется высокими значениями величины погрешности формообразования (аппроксимации), для снижения величины которой необходимо обеспечить ориентацию поверхности, при которой нормаль в точке формообразуемой поверхности будет совпадать с осью конечного звена формообразующей системы. В статье представлены результаты анализа, направленного на установление существующих конструкций устройств для аддитивного формообразования на базе механизмов параллельно-последовательной структуры, обеспечивающих высокую точность позиционирования конечного звена формообразующей системы.

Результаты. Разработана конструкция устройства для аддитивного формообразования изделий по технологии 3DMP – технологии аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитных газов, применение которой обеспечивает высокую точность позиционирования конечного звена формообразующей системы, исключает возможность заклинивания жесткого расходного материала в виде проволоки за счет конструктивного исполнения механизма подачи, который выполнен жестко закрепленным на основании устройства для аддитивного формообразования.

Заключение. Применение разработанной конструкции устройства позволит исключить недостатки существующих устройств для аддитивного формообразования, обеспечить точность позиционирования конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования, исключить возможность заклинивания жесткого расходного материала, расширив, таким образом, область применения аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии; послойный синтез; формообразование; погрешность.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-6406.2018.8.

© Гречухин А. Н., Куц В. В., Олешицкий А. В., Разумов М. С., 2019

Для цитирования: Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А. Н. Гречухин, В. В. Куц, А. В. Олешицкий, М. С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 34-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.

Поступила в редакцию 03.10.2019

Подписана в печать 14.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures

Alexander N. Grechukhin¹✉, Vadim V. Kuts¹, Alexey V. Oleshitsky¹,
Michail S. Razumov¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Accuracy improving of product forming additive methods is described in the paper. Analysis is carried out; new device design for product forming by additive methods is done on the basis of parallel-serial structure mechanisms. This device design provides rigidity of technological system, increased accuracy of final element positioning of forming system, thus expanding technological capabilities of additive formation.

Methods. Formation of parts surfaces by additive methods is characterized by high formation error size (approximation). It is necessary to ensure orientation of the surface in order to reduce the size at which normal will coincide with the axis of forming system final link at formed surface point. The paper presents results of the analysis aimed at existing structures installation of additive forming devices on the basis of parallel-serial structure mechanisms ensuring high accuracy of final link positioning of forming system.

Results. Device design for additive product forming according to 3DMP technology - technology of additive forming with electric arc in protective gases, application of which provides high accuracy of final link positioning of forming system, excludes possibility of rigid consumable material jamming in the form of wire due to design of supply mechanism, which is rigidly fixed on the device base for additive forming.

Conclusion. Application of developed device design will make it possible to eliminate disadvantages of existing devices for additive forming, to ensure accuracy of final link positioning of forming system for additive equipment, to exclude possibility of rigid consumable material jamming, thus expanding application field of additive technologies.

Keywords: additive technologies; layer-by-layer synthesis; shaping; error.

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

Funding: The reported study was funded by Grant of the President of the Russian Federation for young scientists MK-6406.2018.8.

For citation: Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 34-44 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.

Received 03.10.2019

Accepted 14.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Развитие цифрового производства, аддитивных технологий, определено Стратегией научно-технологического развития России. Актуальной задачей в данной связи является создание новых единиц и расширение технологических возможностей оборудования для аддитивного производства, что обусловлено достаточно весомыми преимуществами аддитивных технологий по сравнению с технологией изготовления изделий традиционными методами.

Одним из направлений расширения технологических возможностей оборудования для аддитивного производства является разработка устройств, позволяющих изготовить изделия с высокой точностью и минимальным припуском на последующую механическую обработку (в случае, если таковая является необходимой).

Повышение точности аддитивных методов формообразования возможно за счет снижения погрешности аппроксимации¹ [1].

Материалы и методы решения задачи

В работах [2, 3, 4, 5, 6, 7] был рассмотрен способ снижения погрешности формообразования, заключающийся в придании изделию в процессе выращи-

вания ориентации, обеспечивающей аппроксимацию профиля изделия слоями поперечного сечения с меньшей кривизной.

Механизм предлагаемой пространственной ориентации изделий в процессе их аддитивного формообразования возможно реализовать с применением мехатронных устройств на базе механизмов с последовательной, параллельной и параллельно-последовательной структурами [8].

Основными преимуществами мехатронных систем с параллельной кинематикой являются: высокая точность управления перемещением и ориентацией конечного элемента формообразующей системы в рабочем пространстве технологического оборудования; жесткость при действии динамических нагрузок, а так же компактность устройств, построенных на базе таких механизмов. К недостаткам подобных механизмов следует отнести меньшее рабочее пространство, по сравнению с последовательными структурами, небольшую манипулятивность и сложную конструкцию механизма, в процессе работы которой возникают внутренние связи, ограничивающие их рабочие пространства, которые могут приводить к потере управляемости механизмом [9-12].

Таким образом, для решения задач обеспечения динамической пространственной ориентации изделий в процессе их аддитивного формообразования, альтернативным вариантом механизмов

¹ Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис... канд. техн. наук. Юрга, 2006.

с параллельной и последовательной структурами могут стать механизмы, сочетающие преимущества обозначенных выше устройств, а именно – устройства с гибридной компоновкой.

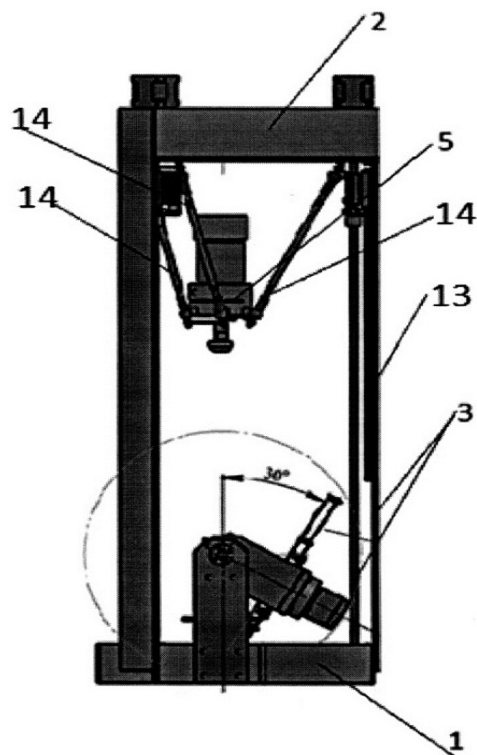


Рис. 1. 3D дельта-принтер: 1 – нижнее основание; 2 – верхнее основание; 5 – печатающее устройство; 13 – ходовой винт; 14 – поводки

Fig. 1. 3D Delta printer: 1 – bottombase; 2 – top base; 5 – printing device; 13 – lead screw; 14 – leashes [8]

Существуют работы, направленные на разработку устройств подобного типа. Так, например, известно устройство – 3 D дельта-принтер. Устройство содержит корпус, соединенный с верхним и нижним основаниями с вертикально расположенными направляющими стержнями, на которых установлены каретки, стол, выполненный наклонно-поворотным с возможностью вращения, печат-

тающее устройство, поводки, каждый из которых одним концом присоединен к соединительной детали, а вторым концом – шарнирно к каретке, блок управления [13].

Данное устройство обеспечивает пространственную ориентацию изделий в процессе их аддитивного формообразования по 5 управляемым координатам за счет наклонно-поворотного стола и перемещающейся печатающей головки. Недостатком такого устройства является возможность заклинивания жесткого расходного материала, например, проволоки из стали при аддитивном формообразовании по технологии 3DMP, в подвижной печатающей головке из-за его перегибов в процессе перемещения печатающей головки.

Технология 3DMP – печать металлической проволокой, при которой формообразование происходит в среде инертного/активного газа или в многокомпонентных газовых смесях в зависимости от типа наплавляемого материала. Преимуществами данной технологии является высокая скорость изготовления деталей, возможность создания крупных изделий, высокий коэффициент использованного материала, лучшие в отрасли механические свойства конечных изделий: отсутствие пористости и термических трещин, дендритная структура. В итоге сокращается время производства и экономятся материалы для заготовки и утилизации металлической стружки [8].

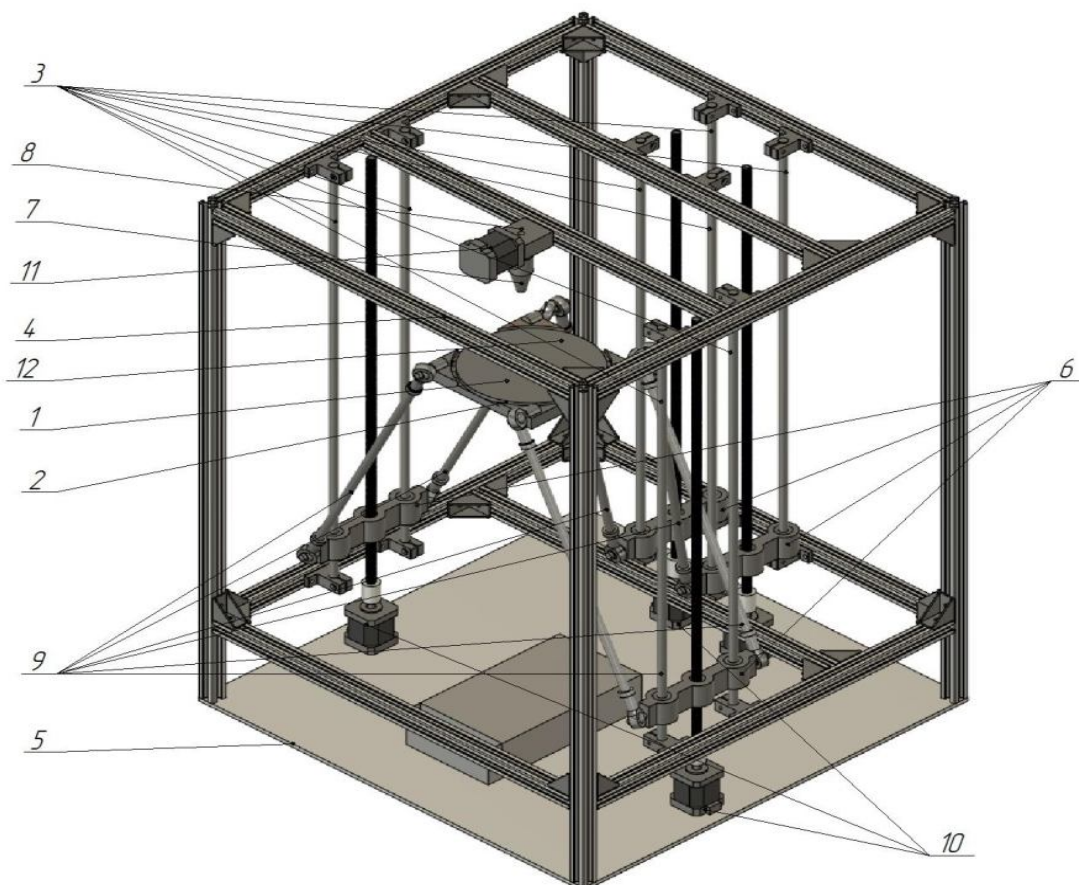


Рис. 2. 3D-принтер с гибридной компоновкой: **1** – стол; **2** – основание рабочего стола; **3** – направляющие стержни; **4** – верхнее основание; **5** – нижнее основание; **6** – каретка; **7** – рабочий инструмент; **8** – соединительная деталь; **9** – поводки; **10, 11, 12** – шаговые двигатели

Fig. 2. 3D- printer with hybrid layout: **1** – table; **2** – desktop base; **3** – guide rods; **4** – upper base; **5** – lower; **6** – carriage; **7** – working tool; **8** – connecting part; **9** – leashes; **10, 11, 12** – stepper motors

Применение данной конструкции устройства при аддитивном формообразовании по технологии 3DMP приводит к пластическим деформации жесткого расходного материала (металлической проволоки), которые затрудняют его подачу в зону печати, что в конечном итоге приводит к заклиниванию материала в печатающей головке.

Актуальной задачей является разработка конструкции устройства [8, 14, 15], исключающего возможность заклинивания подачи жесткого расходного материала при аддитивном формообразовании

изделий по технологии 3DMP в зону печати через печатающую головку¹.

Результаты и обсуждение

Для решения обозначенной выше задачи разработана конструкция устройства для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой [16, 17, 18, 19]. Устройство содержит стол 1, выполненный с возможностью поворо-

¹ Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2012. 366 с.

та вокруг оси Z посредством шагового двигателя 12; основание рабочего стола 2; направляющие стержни 3, закрепленные вертикально на верхнем 4 и нижнем 5 основаниях 3D-принтера; каретки 6, установленные на направляющих стержнях 3, имеющие возможность перемещения по оси Z ; печатающее устройство, включающее рабочий инструмент 7, выполненный в виде устройства для автоматической подачи проволоочного электрода посредством шагового двигателя 11, с подводом смеси защитных газов; соединительная деталь 8; поводки 9, одни из концов которых закреплены шарнирно к угловым точкам основанию стола 1, а вторые закреплены шарнирно к кареткам 6; приводные механизмы кареток 6, выполненные в виде передач типа винт-гайка, приводимых в движение шаговыми двигателями 10, таким образом, обеспечивая управление пространственной ориентацией стола по 5 координатам. Печатающая головка является жестко закрепленной через соединительную деталь к верхнему основанию, подача металлического расходного материала (проволоки из стали) осуществляется под прямым углом, что исключает заклинива-

ние подачи расходного материала при аддитивном формообразовании изделий в результате перегиба.

Устройство работает следующим образом: блок управления передает управляющие команды шаговым двигателям 10, 11, 12, причем шаговые двигатели 10 перемещают каретки 6, изменяя угол наклона поводков 9, обеспечивая столу 1 перемещение по 4 координатам; шаговый двигатель 12 обеспечивает перемещение стола по 5 координате; шаговый двигатель 11 обеспечивает управление подачей расходного материала в виде металлической проволоки к рабочему инструменту 7.

Выводы

Таким образом, применение 3D-принтера с гибридной компоновкой обеспечивает неподвижность печатающей головки в процессе аддитивного формообразования изделий, что в свою очередь исключит возможность заклинивания расходного материала (проволоки из стали) подачи в результате его перегиба, возможного при перемещении печатающей головки в зоне построения 3D-принтера.

Список литературы

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.

2. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms / V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Bychkova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 24. P. 11832-11835.

3. Динамическое управление процессом аддитивного формообразования с применением 5-координатного технологического оборудования / А.Н. Гречухин., В.В. Куц, М.С. Разумов, И.В. Ванин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 1. С. 9-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20>.

4. 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

5. 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

6. Grechukhin A.N., Kudelina D.V., Razumov M.S. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking into account regional specifics // International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering. Vol. 157. P. 198-202.

7. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products // Journal of Physics: Conference Series, 2019. 1210 (1), статья № 012053.

8. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография. Владимир, 2010. 243 с.

9. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3d модели // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2010. № 24. С. 13-21.

10. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S. K. Singhal, A. P. Pandey, P. M. Pandey, A. K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. Nos. 1–4. P. 319–328.

11. Hong S. Byun., Kwan H. Lee Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2006. №. 28. P. 307–313.
12. Massod S. H., Rattanawong W., Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 139. № 1–3. P. 110–116.
13. 3D дельта-принтер Сарапулов С.Н., Ижутов А.В. патент на полезную модель *RUS 186514 17.07.2018.*
14. 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.
15. 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. T. 37. № 9. С. 824-826.
16. 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.
17. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Экспериментальное определение параметров поперечного сечения единичного слоя при аддитивном формообразовании изделий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2018. № 10. С. 264-270.
18. Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, Ю.Э. Симонова // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2019. Т. 15. № 4. С. 111-118.
19. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Решение задачи аппроксимации криволинейных поверхностей слоями с постоянным и переменным сечением при формообразовании аддитивными методами // *Вестник Брянского государственного технического университета.* 2019. № 3 (76). С. 38-40.

References

1. Burns M. *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing.* Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall, 1993, 369 p.
2. 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.

3. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S., Vanin I. V. Dinamicheskoe upravlenie protsessom additivnogo formoobrazovaniya s primeneniem 5-koordinatnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Dynamic control of the additive shaping process using 5-coordinate process equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 9-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20>.

4. 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*, 2018, no. 226, pp. 010-021.

5. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 226, pp. 023-029.

6. Grechukhin A. N., Kudelina D. V., Razumov M. S. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking into account regional specifics. *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering*. no. 157, pp. 198-202.

7. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1210, pp. 1210-1220.

8. Egorov I. N. *Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* [Position-force control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir, 2010, 243 p. (In Russ.).

9. Dobroskok V. L., Abdurayimov L. N., Chernyshov S. I. Ratsional'naya orientatsiya izdelii pri ikh posloinom formoobrazovanii na baze iskhodnoi triangulyatsionnoi 3d modeli [Rational orientation of products with their layer-by-layer shaping on the basis of the original triangulation 3d model]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* = *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2010, no. 24, pp. 13-21 (In Russ.).

10. 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, no. 1-4, pp. 319-328.

11. Hong S. Byun, Kwan H. Lee Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2006, no. 28, pp. 307-313.

12. Massod S. H., Rattanawong W. Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, no. 139, pp. 110–116.

13. Sarapulov S. N., Izhutov A.V. *3D del'ta-printer* [3D Delta printer]: Patent RF na poleznuyu model' RUS patent for utility model RUS 186514 17.07.2018 (In Russ.).

14. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Razumov M. S. Opredelenie 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 Russ.).

15. 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.

16. 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, 4, vol. 14, pp. 122-129 (In Russ.).

17. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Eksperimental'noe opredelenie parametrov poperechnogo secheniya edinichnogo sloya pri additivnom formoobrazovanii izdelii [Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*, 2018, no.10, pp. 264-270 (In Russ.).

18. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Olesnicki A. V., Simon J. E. Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya additivnogo formoobrazovaniya s gibridnoi komponovkoi [Design of technological equipment for additive shaping with hybrid layout]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 111-118 (In Russ.).

19. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Reshenie zadachi approksimatsii krivolineinykh poverkhnostei sloyami s postoyannym i peremennym secheniem pri formoobrazovanii additivnymi metodami [Solution of the problem of approximation of curvilinear surfaces by layers with constant and variable cross-section at forming by additive methods]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2019, no. 3 (76), pp. 38-40 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Гречухин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Alexander N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@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

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Олешицкий Алексей Вячеславович, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oav46@yandex.ru

Alexey V. Oleshitsky, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oav46@yandex.ru

Разумов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mika_1984_@mail.ru

Michail S. Razumov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mika_1984_@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-45-55>

Демпфирующие резцы с варьированием жесткости

В.В. Малыхин ¹ ✉, Е.И. Яцун ¹, С.Г. Новиков ²

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

² ЧОУ ВО «Региональный открытый социальный институт»
ул. Маяковского, 85, г. Курск, 305009, Российская Федерация

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Улучшение формообразования поверхностей лезвийным инструментом является актуальной задачей, так как трудоемкость обработки точением составляет доминирующую часть всех видов обработки. Вибрации в процессе токарного точения являются следствием преждевременного износа инструмента и увеличения шероховатости поверхностей деталей. Новые конструкции резцов для снижения вибраций, возникающих в процессе резания, увеличения их стойкости и повышения качества обработки представляют практический и научный интерес. Целью и задачами предлагаемой конструкционной линейки демпфирующих резцов с регулируемой (управляемой) жесткостью являются: совершенствование конструкций режущего инструмента, позволяющих увеличить его стойкость за счет гашения вибраций; создание эффективных технологических процессов резания материалов, повышающих качество обработки; улучшение эксплуатационных характеристик резцов.

Методы. Существующие конструкции виброгасящих резцов с упругими демпфирующими вставками постоянной жесткости, в которых установлены державка или оправка с режущей пластиной, не отвечают необходимым требованиям по эффективности снижения вибраций из-за невозможности варьирования жесткостью инструмента, кроме того, велика трудоемкость подготовки резцов к работе и демонтажу. Предложены инновационные конструкции резцов с регулируемой (управляемой) жесткостью.

Результаты. Разработанная линейка виброгасящих резцов с варьированием жесткости и учетом недостатков существующих конструкций позволяет, в зависимости от обрабатываемого материала и технологических режимов резания, управлять частотами вибраций возмущающей силы и составных компонентов инструментальной системы, что исключает неконтролируемый рост амплитуды колебаний и значительно продлевает работоспособность резцов с высоким качеством обработки. Разработанные существующие и предложенные новые конструкции демпфирующих резцов позволили составить их классификацию, что дает возможность вести исследования по их совершенствованию.

Заключение. Предлагаемые демпфирующие резцы с варьируемой жесткостью отвечают поставленным целям и задачам. Теоретические исследования и промышленные испытания, простота конструкций и технологий изготовления новых демпфирующих резцов позволяют рекомендовать их для внедрения в производство.

Ключевые слова: обработка лезвийным инструментом; демпфирующий резец; виброгашение; конструкция; державка; выборка; замкнутая эластичная оболочка; устойчивость резания; качество обработки.

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

Для цитирования: Мalykhin В.В., Яцун Е.И., Новиков С.Г. Демпфирующие резцы с варьированием жесткости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 45-55. [https:// doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-45-55](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-45-55).

Поступила в редакцию 25.10.2019

Подписана в печать 02.12.2019

Опубликована 23.12.2019

Damping Cutters with Varying Stiffness

Vitaliy V. Malykhin ¹✉, Elena I. Yatsun ¹, Sergey G. Novikov ²

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

² Public Educational Institution "Regional Open Social Institute"
Mayakovskiy str. 85, Kursk 305009, Russian Federation

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Improving surfaces' forming by a blade tool is an up-to-date task. Labour intensity of turning processing is a dominant part of all working. Vibrations during turning work are the result of premature tool wear and increased surface roughness of the parts. New cutter designs are of practical and scientific interest. They can reduce vibrations occurring during cutting, increase their persistence and improve processing quality. The aim and objectives of this proposed structural line of damping cutters with adjustable (controlled) rigidity are improvement of cutting tool structures, which allow to increase its resistance due to vibration damping; creation of efficient technological processes of cutting materials, which improve quality of treatment; improved operational characteristics of cutters.

Methods. Existing structures of vibration damping cutters with elastic damping pieces of constant rigidity, in which holder or mandrel with cutting plate is installed, do not have necessary requirements for efficiency of vibration reduction due to impossibility of tool stiffness variation. Besides, there is high labour intensity of cutters preparation for operation and dismantling. Innovative cutter designs with adjustable (controlled) rigidity are presented.

Results. The developed line of vibration-quenching cutters with rigidity variation and taking into account disadvantages of existing structures makes it possible to control vibration frequencies of perturbing force and components of a tool system which excludes uncontrolled growth of vibration amplitude and significantly prolongs efficiency of cutters with high quality of processing. It depends on processed material and cutting process modes. Existing and new designs of damping cutters make it possible to classify them. So it is possible to carry out research on their improvement.

Conclusion. Proposed damping cutters with varying rigidity meet goals and objectives. According to theoretical research and industrial tests, simplicity of structures and technologies of new damping cutters manufacturing it is possible to implement them into production.

Keywords: blade tool machining; damping cutter; vibroclearing; design; holder; selection; closed elastic cover; cutting stability; processing quality.

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

For citation: Malykhin V.V., Yatsun E. I., Novikov S.G. Damping Cutters with Varying Stiffness. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 45-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-45-55>.

Received 25.10.2019

Accepted 02.12.2019

Published 23.12.2019

Введение

Необходимость применения новых конструкционных материалов для изготовления изделий с различной технологической и конструктивной сложностью, а также повышенного качества, определено научно-техническим прогрессом в машиностроении. Улучшение формообразования поверхностей лезвийным инструментом является актуальной задачей, так как трудоемкость обработки точением составляет доминирующую часть всех видов обработки.

Исследования состояния токарного точения позволили выявить недостатки и наметить направления поиска разработчиков и производителей режущего инструмента по совершенствованию его конструкций, позволяющих достичь наименьшей интенсивности износа, созданию новых эффективных технологий в расширении режимов резания с максимальной производительностью при заданных параметрах обработки и получению деталей с высококачественными поверхностями.

Вибрации в процессе токарной обработки являются следствием преждевременного износа инструмента и увеличения шероховатости поверхностей деталей. В настоящее время разработаны токарные резцы с использованием элементов для гашения или демпфирования вибраций при резании [1-5].

Существенным недостатком большинства имеющихся конструкций резцов является то, что они жестко связаны со станком. Это не позволяет достичь эффективного снижения вибраций в процессе обработки. Также многие демпфирующие резцы имеют сложные конструкции, а технологии их изготовления весьма затруднительны, работоспособность некоторых вообще вызывает сомнение.

Новые конструкции резцов для снижения вибраций, возникающих в процессе резания, увеличения их стойкости и повышения качества обработки представляют практический и научный интерес.

Целью и задачами предлагаемой конструкционной линейки демпфирующих резцов с регулируемой (управляемой) жесткостью являются:

- совершенствование конструкций режущего инструмента, позволяющих увеличить его стойкость за счет гашения вибраций;
- создание эффективных технологических процессов резания материалов, повышающих качество обработки;
- улучшение эксплуатационных характеристик резцов.

Материалы и методы

Нами разработано несколько вариантов резцов с державкой в упругой вставке или с упругой демпфирующей вставкой в державку [6-10]. Это дает возможность:

– уменьшить уровень вибрации при обработке путем минимизации действующих на державку сил резания подбором жесткости вставки из демпфирующего материала, что увеличивает стойкость резцов;

– улучшить процесс формообразования за счет виброизоляции режущей пластины материалом с высоким демпфированием вставки от металлического резцедержателя.

Демпфирующие резцы не лишены недостатков:

1. Жесткость токарных инструментов постоянна, в связи с этим каждый раз необходимо экспериментально определять величину задаваемых зазоров, заполняемых одинаковым материалом вставки, или подбирать композиционный материал с необходимыми наполнителями, добиваясь требуемой жесткости.

2. Большие затраты времени и трудоемкость на подготовку резцов к работе, связанные с выдерживанием одинаковых указанных зазоров, заполнением их материалом с высоким демпфированием и последующей вулканизацией материала; сложен и демонтаж резцов с извлечением оправки из выборки державки или конца державки с выборкой из металлического стакана.

Для устранения приведенных недостатков необходимы новые разработки. Предложена инновационная конструкционная линейка резцов с регулируемой (управляемой) жесткостью, существенно улучшающая процессы обработки материалов и упрощающая эксплуатацию резцов.

Результаты и их обсуждение

Предложенные конструкции резцов позволяют улучшить эксплуатационные характеристики за счет обеспечения варьирования их жесткости, а также снизить затраты времени и трудоемкость на подготовку к работе и демонтаж.

Резец с управляемой жесткостью показан на рис. 1.

Закачивание воздуха в полости оболочки 5 или сбрасывание из нее давления позволяет смещать частоты собственных колебаний резца и вынуждающей силы резания во избежание резонанса [11].

Возможно также использовать другое конструктивное решение (рис. 2).

Виброгасящий резец отличается от инструмента на рис. 1 тем, что выборка державки 3, оболочка стакана 4 и контейнер 6 изготовлены цилиндрическими. Воздухом в полостях стакана 4 гасятся возникающие при точении колебания и варьируется жесткость инструмента [12, 13].

Представим теперь резцы с металлическими оправками в оболочках из вулканизированного материала, установленные в выборках державок.

На рис. 3 показан общий вид резца одной из конструкций.

Цилиндрическая часть оправки 4 размещена в стакане 5 из композитного материала, в полости которого подается воздух с контролированием давления манометром и варьированием собственной частотой колебаний резца, чтобы продуктивно гасить вибрации [14].

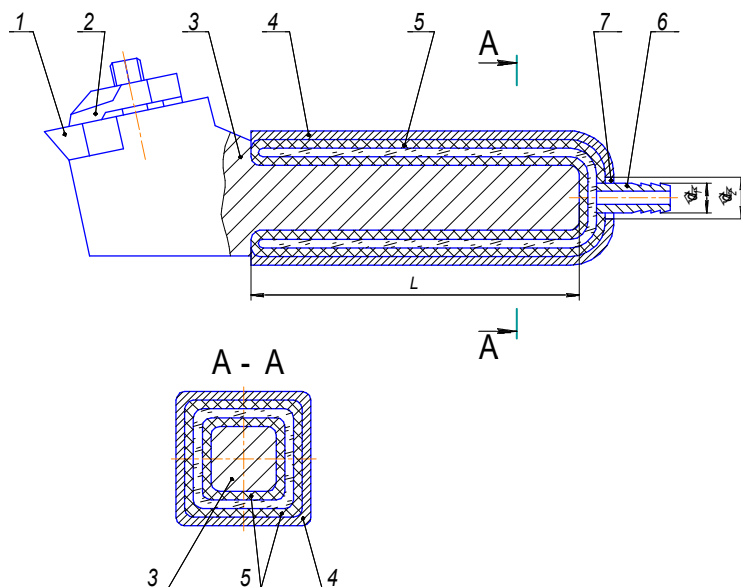


Рис. 1. Демпфирующий резец с возможностью управления его жесткостью

Fig. 1. Damping cutter with the ability to control its rigidity

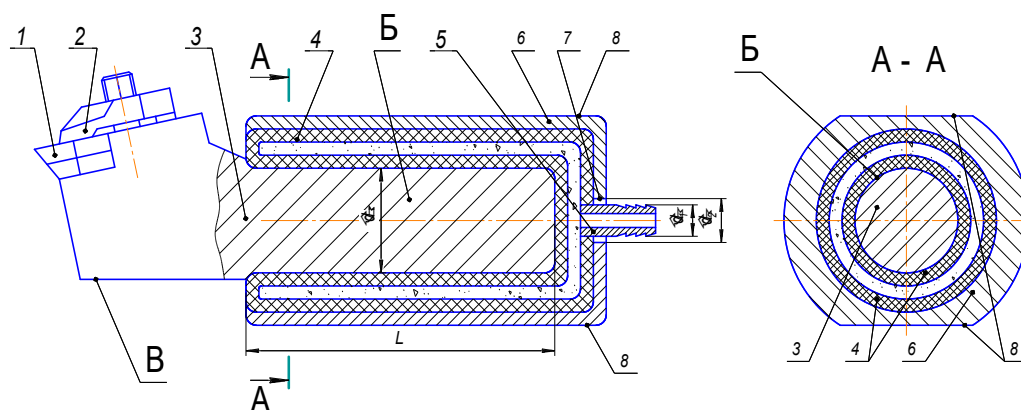


Рис.2. Виброгасительный резец с возможностью регулирования его жесткостью

Fig. 2. Vibration damping tool with the ability to control its rigidity

На рис. 4 изображена еще одна конструкция резца.

Новизна предложенного виброгасящего резца заключается в том, что закачкой сжатого воздуха в полости оболочки контейнера 4 или сбрасыванием давления, возможно управлять жесткостью инструмента.

Вставка 8 размещена с предварительным напряжением сжатия материала,

что дает возможность повысить стойкость резца уменьшением вибрации [15].

Резцы на рис. 1-4 функционируют одинаково.

Существующие и предложенные разработки демпфирующих резцов позволили составить их классификацию, дающую возможность вести исследования по их совершенствованию. Рассматривают токарный инструмент с жесткой и упругой связью с системой СПИД.

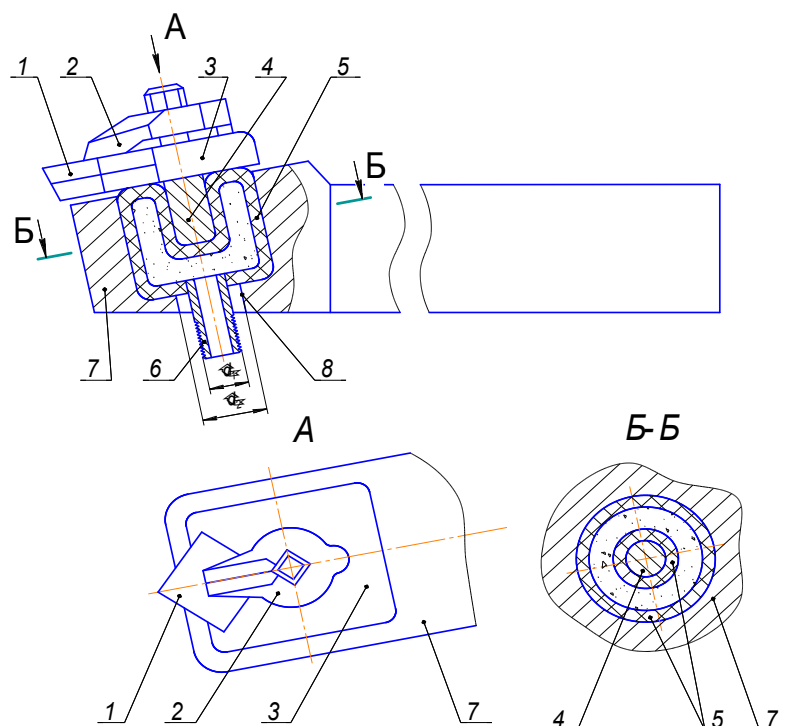


Рис. 3. Демпфирующий резец с возможностью варьирования его собственной частотой колебаний

Fig. 3. Damping cutter with the ability to vary its natural frequency

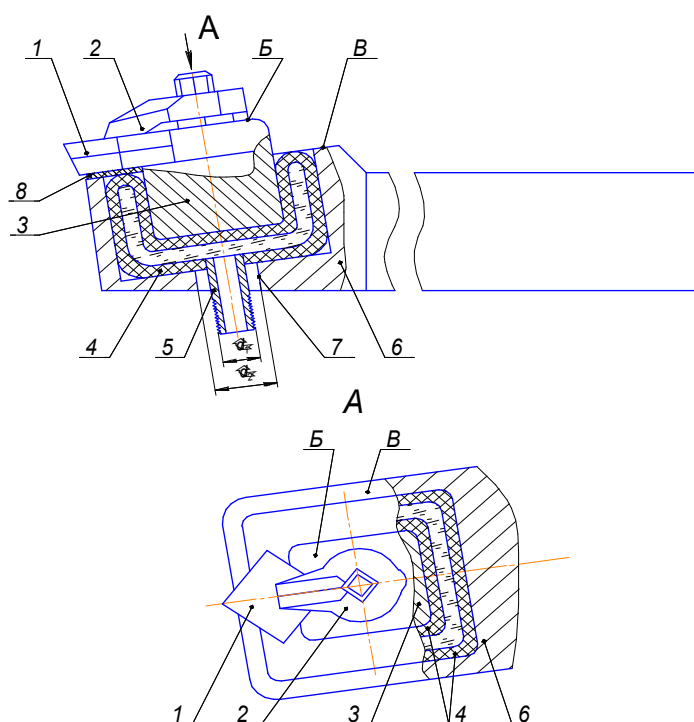


Рис. 4. Виброгасящий резец с повышенной жесткостью рабочей части

Fig. 4. Vibration suppressor with increased rigidity of the working part

К системам с жесткой связью относят резцы: с виброгасящими устройствами; демпфирующей вставкой в державку; державкой в виброгасящем материале.

Принципиально новым классом являются резцы с упругой связкой со станком, которые подразделяют на: с постоянной жесткостью и упругой демпфирующей вставкой в державку, а также с державкой в упругой оболочке; резцы с переменной регулируемой и управляемой жесткостями.

Исследования резцов обычной и новых конструкций позволяют резюмировать:

– новые конструкции резца снижают показатели вибрации в среднем на 30% по отношению к обычному;

– при точении виброгасящим резцом наблюдается уменьшение шероховатости R_a обработанной поверхности на 20...40% и улучшение ее качества.

Выводы

Представленная линейка резцов продлевает их работоспособность с обеспечением высокого качества обработки за счет виброгашения и возможности варьирования жесткости инструмента.

Предлагаемые демпфирующие резцы с варьируемой жесткостью отвечают поставленным целям и задачам. Теоретические исследования и промышленные испытания, простота конструкций и технологий изготовления новых демпфирующих резцов позволяют рекомендовать их для внедрения в производство.

Список литературы

1. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки твердыми сплавами и композитами: монография / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск, 2016. С.160-124.
2. Пат. 2009768 Российская Федерация, МПК⁵ B23B27/00. Резец / Рогов В.А.; заявитель и патентообладатель Российский университет дружбы народов. №5014352/08; заявл. 02.12.91; опубл. 30.03.94. 3 с.
3. Пат. 2280542 Российская Федерация, МПК⁷ B23B27/00. Резец / Васин Л.А., Бородкин Н.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тульский государственный университет (ТулГУ). 25.04.2005; опубл. 27.07.2006. 4 с.
4. Пат. 2287405 Российская Федерация, МПК B23B27/10. Резец / Полежайкин Г.М., Лadoшкин Н.А., Фомин А.Г., Полежайкин И.Г., Ефаньева Т.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. №2005 124 690/02; заявл. 02.08.2005; опубл. 20.11.2006. 3 с.

5. Пат. 2107588 Российская Федерация, МПК В23В27/16. Резец / Войтенко В.Г., Татаркин Е.Ю., Ситников А.А.; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный университет. №96123454/02; заявл. 15.12.96; опубл. 27.03.98. 3 с.

6. Пат. 2 457 078 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец/ Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И.[и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». № 2010 145193/02; заявл. 03.11.2010; опубл.27.07.2012, Бюл. № 21.

7. Пат. 2 596 546 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Демпфирующий резец/ Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». № 2015114 463/02; заявл. 20.04.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25.

8. Пат. 2 457 077 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Демпфирующий резец/ Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». № 2011 106 621/02; заявл. 22.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

9. Пат. 2582403 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Демпфирующий резец/ Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». № 2015 103203/02; заявл. 03.02.2015; опубл. 27.04.2016, Бюл. № 12.

10. Демпфирующие резцы постоянной жесткости и упругой связью с системой «Станок - инструмент – деталь» / С.Г. Емельянов, В.В Малыхин., Е.И. Яцун, С.Г. Новиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч. 2. С.22-31.

11. Пат. 2 535196 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Демпфирующий резец с управляемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; патентообладатель ФБОУ ВПО «Юго-западный государственный университет». №2013113649/02; заявл. 26.03.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34.

12. Пат. 2 479385 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00, Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью/ С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; патентообладатель ФБОУ ВПО «Юго-западный государственный университет». №2011141683/02; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. №11.

13. Яцун Е.И., Малыхин В.В., Новиков С.Г. Разработка и исследование конструкций демпфирующих резцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч.1. С.287-296.

14. Пат. 2 511 193 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». № 2012144043/02; заявл. 16.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10.

15. Пат. 2 621 939 Российская Федерация, МПК⁵¹ В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец с управляемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». № 2015116208/02; заявл. 28.04.2015; опубл. 08.06.2017, Бюл. №16.

References

1. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Zubkova O.S. Novikov S.G. *Instrumental'noe obespechenie protsessov mekhanicheskoi obrabotki tverdymi splavami i kompozitami* [Tool support of machining processes with hard alloys and composites]. Kursk, 2016, pp.160-124 (In Russ.).

2. Rogov V.A. *Rezets* [Cutter]: Patent RF, no. 2009768, 1994.

3. Vasin L.A., Borodkin N.N. *Rezets* [Cutter]: Patent 2280542 RF, MPK7 V23V27/00/ applicant patent holder GOU VPO Tula State University (TulSU), 25.04.2005; publ. 07.27.2006 (In Russ.).

4. Polezhaikin G.M., Ladoshkin N.A., Fomin A.G., Polezhaikin I.G., Efanyeva T.G. *Rezets* [Cutter]: Patent 2287405 RF, MPK V23V27/10/ applicant patent holder GOU VPO Mordovian State University named after N.P. Ogareva, 11.20.2006 (In Russ.).

5. Voitenko V.G., Tatarkin E.Yu., Sitnikov A.A. *Rezets* [Cutter]: Patent 2107588 RF, MPK V23V27/16/ applicant patent holder Altai State University, 03.27.1998. (In Russ.).

6. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [et al.] *Universal'nyi dempfiruyushchii rezets* [Universal damping tool]: Patent 2 457 078 RF, IPC51 V23V27 / 00 / applicant patent holder FSBEI HPE Southwest State University, 27.07.2012 (In Russ.).

7. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [et al.] *Dempfiruyushchii rezets* [Damping tool]: Patent 2 596 546 RF, IPC51 V23V27 / 00, / applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University, 10.09.2016 (In Russ.).

8. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [et al.] *Dempfiruyushchii rezets* [Damping tool]: Patent 2 457 077 RF, IPC51 V23V27 / 00, applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University. 27.07.2012 (In Russ.).

9. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [et al.] Dempfiruyushchii rezets [Damping tool]: Patent 2582403 RF, IPC51 V23V27 / 00, applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University. 04.27.2016 (In Russ.).

10. Emelyanov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G. Dempfiruyushchie reztsy postoyannoi zhestkosti i uprugoi svyaz'yu s sistemoi «Stanok - instrument – detal'» [Damping cutters of constant stiffness and elastic connection with the system "Machine - tool - part"]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical Science*, 2017, vol. 8, pt. 2. pp. 22-31 (In Russ.).

11. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [and others] Dempfiruyushchii rezets s upravlyaemoi zhestkost'yu [Damping tool with controlled stiffness] Patent 2 535196 RF, IPC51 V23V27 / 00, applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University. 12.10.2014 (In Russ.).

12. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [and others] Dempfiruyushchii rezets s reguliruemoi zhestkost'yu [Damping cutter with adjustable stiffness] Patent 2 479385 RF, IPC51 V23V27 / 00, / applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University. 13.10.2011 (In Russ.).

13. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Novikov S.G. Razrabotka i issledovanie konstruktssii dempfiruyushchikh reztsov [Development and research of structures of damping incisors]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical Science*, 2016, vol. 8, pt. 1, pp.287-296 (In Russ.).

14. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [and others] Universal'nyi dempfiruyushchii rezets s reguliruemoi zhestkost'yu [Universal damping cutter with adjustable stiffness] Patent 2 511 193 RF, MPK51 V23V27 / 00, applicant patent holder of FSBEI HPE Southwest State University. 10.04.2014 (In Russ.).

15. Universal'nyi dempfiruyushchii rezets s upravlyaemoi zhestkost'yu: pat. 2621939, Ros. Federatsiya: IPC51 V23V27/00 / S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun [et al.]; zayavitel' patentoobladatel' GOU VPO Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet (SWSU) [Universal damping tool with controlled stiffness]: Pat. 2621939 ROS. Federation: IPC51 V23V27/00 S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun [et al.]; applicant patent holder FSBEI HPE Southwest State University (SWSU). June 8, 2017; publ. 04/28/2015.

Информация об авторах / Information about the Authors

Малыхин Виталий Викторович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: malykhin1946@mail.ru

Vitaliy V. Malykhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: malykhin1946@mail.ru

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

Elena I. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mtio@kurskstu.ru

Новиков Сергей Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, ЧОУ ВО «Региональный открытый социальный институт», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: novikov.s.46@mail.ru

Sergey G. Novikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Public Educational Institution "Regional Open Social Institute" Kursk, Russian Federation, e-mail: novikov.s.46@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76>

Влияние способа получения высокоуглеродистой инструментальной стали У10А на физико-механические, технологические и коррозионные свойства

Н. Н. Сергеев¹, А. Н. Сергеев¹, С. Н. Кутепов¹, И. В. Минаев²,
А. Е. Гвоздев¹, Е. В. Агеев³ ✉, Д. С. Клементьев¹, О.В. Кругляков³

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация

³ ООО НПП «Телар»
Городской переулок, 39, г. Тула, 300026, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель работы – исследование влияния качества первородной шихты на комплекс физико-механических, технологических и коррозионных свойств высокоуглеродистой инструментальной стали У10А.

Методы. В качестве объекта исследования была выбрана высокоуглеродистая инструментальная сталь У10А, выплавленная в ПАО «Тулачермет» с использованием металлургических окатышей губчатого железа, обычного металлического лома и заготовки, полученной методом кипящего шлакового слоя. Сталь выплавляли в трехтонной дуговой печи, подвергали внепечной вакуумной обработке в ковше, разливали на заготовки сечением 280×320 мм и замедленно охлаждали вместе с печью. Затем полученные заготовки проковывали на квадрат размерами 150×150 мм (для изготовления штампов) и 40×40 мм (для образцов) с охлаждением в песке и последующим отжигом. Экспериментальное исследование химического состава плавок стали У10А определяли методом фотоэлектрического спектрального анализа с помощью атомно-эмиссионного спектрометра «SA 2000» по ГОСТ 18895-97.

Результаты. Установлено, что использование чистой первородной шихты положительно сказывается на свойствах выплавленного металла. Сталь У10А, выплавленная на первородной шихте, по прочностным характеристикам не уступает стали на ОМШ, превосходя последнюю по пластическим свойствам и особенно по ударной вязкости. Показано, что сталь, выплавленная на первородной шихте, отличается более низким содержанием микропримесей, обладает меньшей устойчивостью к распаду аустенита и более низкой прокаливаемостью. Выявлено, что из-за меньшей устойчивости аустенита, сталь, выплавленная на первородной шихте, должна иметь более высокую критическую скорость закалки, что следует учитывать при выборе режимов термообработки. Установлено, что длительная прочность стали У10А в среде, вызывающей водородное растрескивание, во многом зависит от режимов термической обработки и от чистоты стали. Более чистая сталь обладает большей стойкостью против водородного растрескивания и, следовательно, большей долговечностью в процессе эксплуатации.

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

© Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Минаев И. В., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., Клементьев Д. С., Кругляков О.В., 2019

Ключевые слова: инструментальные стали; хладноломкость; примеси; аустенит; первородная шихта; прокаливаемость; термообработка.

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

Финансирование: Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Для цитирования: Влияние способа получения высокоуглеродистой инструментальной стали У10А на физико-механические, технологические и коррозионные свойства / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, И. В. Минаев, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев, О.В. Кругляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 56-76. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76>.

Поступила в редакцию 27.09.2019

Подписана в печать 12.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Influence of the Method of Producing High-Carbon Tool Steel U10A on the Physical, Mechanical, Technological and Corrosion Properties

Nikolay N. Sergeev¹, Aleksandr N. Sergeev¹, Sergey N. Kutepov¹, Igor V. Minaev³, Aleksandr E. Gvozdev¹, Evgeniy V. Ageev³ ✉, Denis S. Klement'yev¹, Oleg V. Kruglyakov³

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

² LLC NPP Telar
39 Gorodskoy str., Tula 300026, Russian Federation

³ Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research is study of the effect of the quality of the original charge on the complex of physical, mechanical, technological and corrosion properties of high-carbon tool steel U10A.

Methods. High-carbon tool steel U10A, smelted at Tulachermet PJSC using metallized sponge iron pellets, scrap metal and a billet obtained by the fluidized slag blanket, has been chosen as the object of study. Steel was smelted in a three-ton arc furnace, subjected to out-of-furnace vacuum treatment in a ladle, cast into billets with a cross section of 280 × 320 mm and cooled slowly together with the furnace. Then, the obtained blanks were forged into a square of 150 × 150 mm (for making dies) and 40 × 40 mm (for samples) with cooling in sand and subsequent annealing. The experimental study of the chemical composition of U10A steel melts was determined by the method of photoelectric spectral analysis using an atomic emission spectrometer SA 2000 according to GOST 18895-97.

Results. It has been found that the use of pure original charge has a positive effect on the properties of the melted metal. Steel U10A, smelted on the original charge, is not inferior in strength characteristics to steel on OMSH, surpassing the latter in terms of its plastic properties and especially in toughness. It is shown that steel smelted on the original charge is characterized by a lower content of micro-impurities, has less resistance to austenite decomposition and lower hardenability. It is revealed that, due to the lower stability of austenite, steel melted on the original charge must have a higher critical hardening rate, which should be taken into account when choosing heat treatment modes. It is established that the long-term strength of U10A steel in a medium that causes hydrogen

cracking, largely depends on the heat treatment conditions and on the purity of the steel. Cleaner steel has a higher resistance to hydrogen cracking and, therefore, greater durability during operation.

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

Keywords: tool steel; cold brittleness; impurities; austenite; original charge; hardenability; heat treatment.

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

Funding: Work performed under the project No. 11.6682.2017/8.9.

For citation: Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutevov S. N., Minaev I. V., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'yev D. S., Kruglyakov O. V. Influence of the Method of Producing High-Carbon Tool Steel U10A on the Physical, Mechanical, Technological and Corrosion Properties. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 56-76 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-56-76).

Received 27.09.2019

Accepted 12.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Постоянно повышающиеся требования к качеству выпускаемой продукции черной и цветной металлургии ставят перед инженерами-технологами задачу получения сталей и сплавов, обладающих высоким комплексом физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств и способных воспринимать длительно действующие статические, динамические и циклические нагрузки без разрушения.

Одним из эффективных методов получения высококачественных сталей является применение в процессе ее выплавки чистой первородной шихты свободной или почти свободной от вредных примесей [1, 2]. Причем, по мнению А.П. Гуляева [2], более важно иметь чистую шихту, чем удалять серу и газы сложными металлургическими приемами.

О причине улучшения физико-механических свойств стали, выплав-

ленной на первородной шихте, большинство авторов высказываются осторожно и предположительно. Одни видят причину в меньшем содержании примесей и неметаллических включений [3-5]; другие считают, что изменение свойств стали, выплавленной на первородной шихте, происходит из-за большего роста зерна при нагреве, чем у стали, выплавленной на ломе [1, 2]. Большинство авторов предполагает, что особые свойства стали, выплавленной на шихте прямого восстановления, вызваны строением, чистотой и состоянием границ зерен [1, 2, 4]. Однако вплоть до настоящего времени нет четкого представления о причине такого влияния шихты на свойства сталей.

Цель настоящей работы – исследование влияния качества первородной шихты на комплекс физико-механических, технологических и коррозионных свойств высокоуглеродистой инструментальной стали У10А.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана высокоуглеродистая инструментальная сталь У10А, выплавленная в ПАО «Тулачермет» с использованием металлизированных окатышей губчатого железа (ГЖ), обычного металлического лома (ОМШ) и заготовки, полученной методом кипящего шлакового слоя (КШС).

Сталь выплавляли в трехтонной дуговой печи, подвергали внепечной вакуумной обработке в ковше, разливали на УНРС на заготовки сечением 280×320 мм и замедленно охлаждали вместе с печью. Затем полученные заготовки проковывали на квадрат размерами 150×150 мм (для изготовления штампов) и 40×40 мм (для образцов) с охлаждением в песке и последующим отжигом. Химический состав исследуемых плавок стали приведен в табл. 1.

Экспериментальное исследование химического состава плавок стали У10А определяли методом фотоэлектрическо-

го спектрального анализа с помощью атомно-эмиссионного спектрометра «SA 2000» по ГОСТ 18895-97.

В литом материале определяли загрязненность неметаллическими включениями по ГОСТ 1778-70 методом П. Для правильного выбора режимов термической обработки определяли склонность стали к росту зерна, устойчивость к распаду аустенита и прокаливаемость, чтобы выявить влияние первородной шихты на технологические свойства металла.

Склонность к росту зерна аустенита изучали на образцах Ø8 мм и $l = 15$ мм, которые подвергали вакуумному травлению в диапазоне температур 780...1200°C в течение одного часа с последующим ускоренным охлаждением, чтобы предотвратить межфазное травление зерен. Величину зерна определяли при сто-кратном увеличении по ГОСТ 5639-82 путем просмотра всей площади шлифа и сравнения видимых на шлифе зерен с эталонными изображениями (шкалы № 1-3).

Таблица 1. Химический состав исследуемых плавок стали У10А

Table 1. The chemical composition of the studied melts of steel U10A

№ плавки	Шихта	Внепечная обработка с вакуумом	Химический состав, %							
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr
1	ОМШ	с обработкой	1,00	0,22	0,26	0,016	0,011	0,10	0,10	0,03
2	ОМШ	без обработки	1,01	0,21	0,26	0,015	0,015	0,13	0,12	0,09
3	ГЖ	с обработкой	0,97	0,18	0,23	0,012	0,014	0,09	0,04	0,11
4	ГЖ	с обработкой	0,96	0,15	0,24	0,012	0,008	0,03	0,02	0,09
5	КШС	с обработкой	0,98	0,17	0,30	0,028	0,025	0,03	0,04	0,04
6	КШС	с обработкой	1,00	0,18	0,24	0,027	0,025	0,05	0,09	0,10

Каждый шлиф просматривали по четырем диаметрам (20 полей зрения).

Прокаливаемость определяли методом торцевой пробы по ГОСТ 5657-69 и методом объемной закалки на образцах стали У10А, выплавленной на ГЖ и ОМШ, прошедшей после кристаллизации горячую деформацию. В первом случае выбирали температуры закалки 780 и 850 °С. Для объемной закалки использовали образцы квадратного (20×20 мм) и круглого Ø20 мм сечения; температура закалки составляла 850 °С.

Исследование устойчивости аустенита к распаду при охлаждении проводили на вакуумном dilatометре «Formastor». Для этого образцы нагревали до 850 °С, выдерживали 15 мин и охлаждали вместе с печью. Температуру нагрева выбрали выше критической точки A_{cm} на 50 °С с тем, чтобы растворился избыточный вторичный цементит. Для исключения влияния размера зерна аустенита на устойчивость его к распаду при охлаждении получали в разных плавках стали У10А зерно аустенита одинакового размера.

Металлографические исследования проводили на металломикроскопе МИМ-8. Структуру металла изучали в литом состоянии послековки и термической обработки. Определение дисперсности перлита выполняли по ГОСТ 8233-56.

Термообработанные образцы проходили механические испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84), ударный изгиб при комнатной и пониженной

температурах (ГОСТ 9454-78, образцы 1 типа 1, копер МК30А).

Испытания на длительную прочность в водородсодержащих средах проводили при комнатной температуре на образцах Ø12 мм и $l=150$ мм. В качестве агрессивной среды, вызывающей наводороживание, использовали водный раствор серной кислоты с добавлением роданистого аммония (4,5% H_2SO_4 + 2,5% NH_4CNS). Наводороживание образцов осуществляли методом катодной поляризации при плотности тока $D_k = 60$ А/м². Стойкость стали к ВР оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4...6 образцов на каждую точку графика.

Результаты и их обсуждение

Проведенный фотоэлектрический спектральный анализ химсостава исследуемых плавов стали У10А показал, что все плавки имеют близкий химический состав по основным элементам (см. табл. 1), но имеется значительное различие в содержании вредных примесей и примесей цветных металлов. Наиболее чистыми по содержанию S, P, Cu и Ni являются плавки ГЖ. Содержание Cu и Ni в плавках на полупродукте КШС меньше, чем в плавках на ОМШ, однако полупродукт КШС имеет повышенное содержание S и P.

Результаты химического анализа плавов по микропримесям приведены в табл. 2, из анализа которой видно, что наименьшее количество примесей Sn, Sb и As содержится в стали У10А, вы-

плавленной с использованием ГЖ. Анализ проводили только для плавов на ОМШ и ГЖ, но основываясь на имеющихся в работе [2] данных можно ожи-

дать, что содержание микропримесей в плавках на шихте КШС значительно меньше, чем в плавках на ОМШ.

Таблица 2. Содержание микропримесей в стали У10А

Table 2. The content of micro impurities in steel U10A

№ плавки	Шихта	Содержание микропримесей, %				
		Pb	Sn	Zn	Sb	As
1	ОМШ	< 0,0001	0,06...0,010	0,0002	0,0014...0,002	0,01
2	ОМШ	0,0001	0,01	0,0002...0,006	0,0013...0,002	0,012...0,014
3	ГЖ	0,0001	0,0001	0,0002...0,0004	0,0001...0,0002	< 0,001
4	ГЖ	< 0,0001	< 0,0001	0,0002	0,0001	< 0,001

Далее проводили газовый анализ образцов, результаты которого приведены в табл. 3. По результатам газового анализа наиболее чистыми по азоту были плавки на ГЖ, а максимальное содержание азота наблюдали в плавках на полупродукте КШС. По количеству кислорода наиболее чистыми оказались плавки на КШС. Количество кислорода в плавках на ОМШ и особенно на ГЖ значительно меняется от плавки к плавке.

Исследование степени загрязненности литой стали неметаллическими вклю-

чениями показало, что наибольшей степенью загрязненности, главным образом сульфидными включениями, характеризовались плавки на полупродукте КШС (табл. 4), по-видимому, из-за повышенного содержания в них серы. Плавка № 1 на ОМШ занимает промежуточное положение по степени загрязненности. Во всех плавках наблюдается незначительная ориентация оксидных и сульфидных включений, под углом примерно 45°, что, по-видимому, обусловлено кристаллизацией в УНРС.

Таблица 3. Содержание газов в исследуемых плавках стали У10А

Table 3. The gas content in the studied steel melts U10A

№ плавки	Шихта	Содержание, %	
		Кислород	Азот
1	ОМШ	0,0075...0,0090	0,0086
2	ОМШ	0,008...0,010	0,006
3	ГЖ	0,005	0,0044
4	ГЖ	0,039...0,040	0,004...0,0052
5	КШС	0,0045	0,012
6	КШС	0,0046	0,02

Таблица 4. Количество неметаллических включений в стали У10А и их средний размер по данным металлографического анализа

Table 4. The number of non-metallic impurities in steel U10A and their average size according to metallographic analysis

№ плавки	Шихта	Объемная доля, %		Суммарный объем (Σ , %)	Количество включений на $1 \text{ см}^2 (N, \text{см}^{-2})$	Средний размер включений ($\bar{d}$, мкм)
		Оксидов	Сульфидов			
1	ОМШ	0,0105	0,0370	0,0475	6145	2,8
2	ОМШ	0,0106	0,0228	0,0334	3820	3,1
3	ГЖ	0,0100	0,0315	0,0415	3671	3,1
4	ГЖ	0,0130	0,0260	0,0390	3829	3,1
5	КШС	0,0156	0,0500	0,0656	8039	2,6
6	КШС	0,0185	0,0574	0,0759	7539	2,6

Для корковой зоны слитков характерно наличие мелких оксидов, в центре слитков наблюдали большое количество крупных сульфидов и оксисульфидов. Наибольшее количество мелких оксидов содержится в плавках на ОМШ и КШС в корковой зоне слитка. В этих же плавках наблюдали большой объемный процент сульфидов (табл. 4).

Структура горячеформированной стали, выплавленной на различных исходных шихтах, была одинаковой и представляла собой пластинчатый перлит с небольшим количеством вторичного цементита. Исследование склонности к росту аустенитных зерен показало, что при температурах вакуумного травления несколько выше $A_1 (t = 780^\circ\text{C})$ в структуре имеются мелкие аустенитные зерна с извилистыми незамкнутыми границами.

Структура была в основном однородной. При повышении температуры нагрева наблюдали увеличение размера зерна в образцах всех плавов (рис. 1).

В интервале температур $850 \dots 1050^\circ\text{C}$ проявлялась разнотернистость. Встречались зерна очень крупных размеров, особенно в плавке на ОМШ. В плавках на ГЖ наряду с зернами № 3...5 наблюдались зерна № 1...2. В плавках на полупродукте КШС структура была более равномерной, со спрямленными границами зерен, форма которых приближалась к полиэдрической.

При дальнейшем повышении температуры до 1200°C разнотернистость стали на полупродукте КШС увеличивалась (зерна № 2 присутствовали среди большого количества зерен № 4), но все же оставалась меньшей, чем в стали на ГЖ.

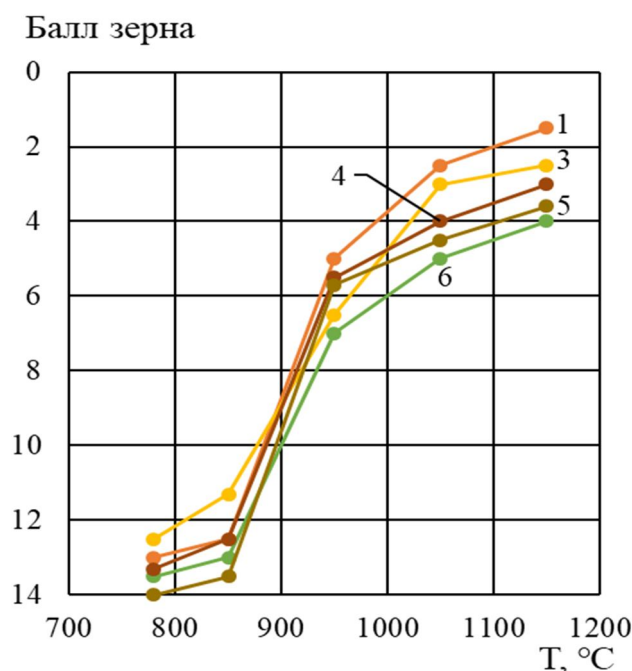


Рис. 1. Склонность к росту зерна аустенита в исследованных плавках стали У10А (у кривых приведены номера плавков)

Fig. 1. The tendency to grain growth of austenite in the studied melts of steel U10A (curves show the numbers of heats)

Анализ кинетических зависимостей роста зерен позволил выделить три периода их роста. Для первого периода (780...870 °С) характерно незначительное изменение размеров, различающееся для исследованных плавков, во втором периоде (850...950 °С) происходит интенсивный и неравномерный рост зерен с образованием разноструктурности и в третьем (выше 950 °С) – менее интенсивный рост зерен. В интервале температур 850...950 °С сталь на чистой шихте КШС обладает большей склонностью к росту зерна, что согласуется с данными работ [2, 5, 6] и может быть объяснено пониженным количеством поверхностно-активных примесей в этих плавках и механизмом рассыпания этих границ.

Выше 1000 °С механизм роста зерен контролируется миграцией границ; особенно сильное влияние могут оказывать избыточные фазы и неметаллические включения, присутствующие во всех плавках.

Исследование устойчивости аустенита к распаду при охлаждении показало, что температура начала и конца фазового превращения в исследованных плавках различалась.

Меньшей устойчивостью к распаду при охлаждении с печью обладает аустенит стали, выплавленной на полупродукте КШС ($t_{\text{НФП}} = 700$ °С), наиболее устойчив аустенит стали на ОМШ ($t_{\text{НФП}} = 680$ °С). Подобное различие в устойчивости аустенита можно объяснить наличием в плавках различного

содержания микропримесей Cu, Cr, Sb, Sn, As, которые, являясь поверхностно-активными, понижают энергию границ зерен и затрудняют распад аустенита.

Далее были выполнены исследования по установлению влияния вида шихты на закаливаемость и прокаливаемость стали У10А.

Закаливаемость стали в основном определяется содержанием в ней углерода и в меньшей степени зависит от содержания легирующих элементов и

других факторов [2], поэтому вид применяемой шихты не должен влиять на ее закаливаемость. Это подтверждается результатами измерения твердости стали У10А в закаленном состоянии (табл. 5).

Исследование прокаливаемости, выполненное методом торцевой закалки от температур 780 и 850 °С, позволило установить, что при одинаковой поверхностной твердости прокаливаемость плавов на ОМШ выше, чем для плавов ГЖ (рис. 2, а).

Таблица 5. Влияние вида шихты на закаливаемость стали У10А

Table 5. The effect of the type of charge on the hardenability of steel U10A

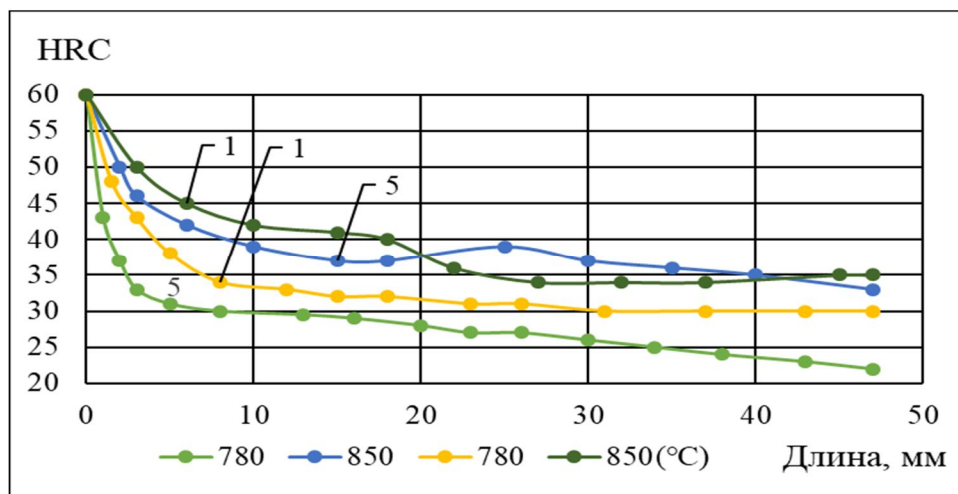
№ плавки	Шихта	Твердость стали, HRC		
		Закалка от 780 °С в воду после горячей деформации	Закалка от 780 °С в воду после трехчасового отжига при 760 °С	Закалка от 850 °С в воду
1	ОМШ	63	63	61
2	ОМШ	63	63	61
4	ГЖ	64	64	62
5	КШС	62	—	61
6	КШС	61	—	61

Исследование прокаливаемости методом объемной закалки (рис. 2, б-в) показало, что сталь плавов на чистой шихте по прокаливаемости различается мало (несколько ниже прокаливаемость у плавов КШС). Таким образом, повышение чистоты шихты уменьшает прокаливаемость стали У10А. Это хорошо согласуется с результатами дилатометрического анализа по устойчивости аустенита стали У10А разных плавов к распаду при охлаждении: чем больше

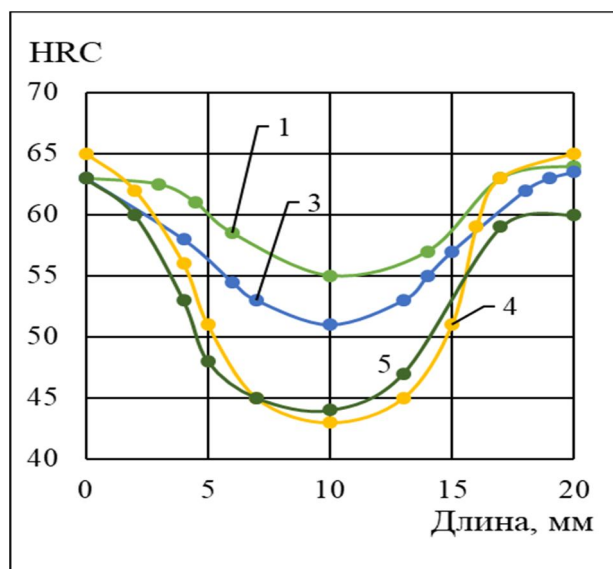
склонность к распаду, тем ниже прокаливаемость.

Проведенные исследования показали, что стали, выплавленные на первородной шихте, отличаются меньшим содержанием микропримесей, меньшей устойчивостью аустенита и меньшей прокаливаемостью.

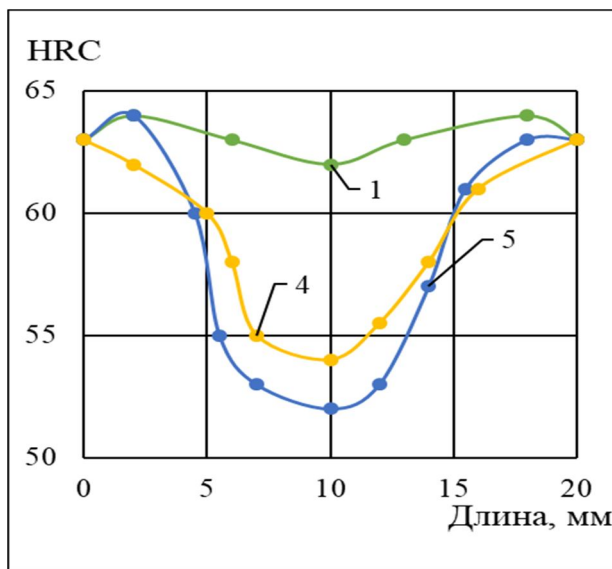
Следовательно, они должны иметь более высокую критическую скорость закалки, что необходимо учитывать при выборе режимов термической обработки.



а)



б)



в)

Рис . 2. Влияние вида шихты на прокаливаемость стали У10А, определенную методом торцевой заправки от 780 и 850 °С (а), объемной заправки (от 850 °С) квадратного (б) и круглого сечения (в). У кривых указаны номера плавов

Fig. 2. The effect of the type of charge on the hardenability of steel U10A, determined by the method of gradient quenching from 780 and 850 °C (а), volume hardening (from 850 °C) square (б) and round section (в). The curves indicate the numbers of heats

Перечисленные факторы вероятно должны оказывать влияние на служебные характеристики изделий, критерием которых является их долговечность.

Поэтому были проведены дополнительные исследования по определению влияния шихты и термообработки стали У10А на микроструктуру, механические

свойства и длительную прочность в средах, вызывающих водородное растрескивание. Перед испытаниями образцы подвергали стандартной термической обработке: нормализации от 840 °С (выдержка 0,5 ч); отжигу при 760 °С (выдержка 3 ч); заалке от 780 °С в воду и отпуску при 180 °С (вы-

держка 1,5 ч); закалке от 780 °С в воду и отпуску при 660 °С (выдержка 3 ч). Результаты исследований приведены в табл. 6.

Сравнение дисперсности структуры (табл. 7) показало, что наиболее измельчены структурные элементы ме-

талла КШС (литое состояние). Пластическая деформация приводит к уменьшению межпластинчатого расстояния перлитной структуры в среднем вдвое, при этом несколько выравнивается дисперсность по плавкам.

Таблица 6. Дисперсность перлитной структуры

Table 6. The dispersion of the pearlite structure

№ плавки	Шихта	Механические свойства				Стойкость в среде, вызывающей ВР при напряжении 300 МПа, час
		σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²	
Нормализация						
1	ОМШ	890	16,5	25	—	—
2	ОМШ	950	15,5	23	0,08	—
3	ГЖ	860	18	25	0,05	—
4	ГЖ	910	12,5	26	0,08	—
5	КШС	770	18	37	—	—
6	КШС	780	15	35	—	—
Отжиг						
1	ОМШ	620	28	56	0,28	87
2	ОМШ	720	21,8	35	0,34	65
3	ГЖ	660	26	44	0,27	203
4	ГЖ	630	32	60	0,20	314
5	КШС	660	25	53	0,62	411
6	КШС	690	28	56	0,69	480
Закалка и высокий отпуск						
1	ОМШ	720	27	49	0,24	50
2	ОМШ	730	26	49	0,35	40
3	ГЖ	700	27	56	0,48	96
4	ГЖ	740	24	57	0,32	124
5	КШС	740	25	52	0,81	165
6	КШС	770	23	51	0,84	198

Таблица 7. Дисперсность перлитной структуры

Table 7. The dispersion of the pearlite structure

№ плавки	Шихта	Дисперсность перлитной структуры, балл		Межпластинчатое расстояние, мкм	
		литое	деформированное	литое	деформированное
1	ОМШ	7,5	5	1,2	0,8
2	ОМШ	7,5	4	1,6	0,6
3	ГЖ	8	4	1,2	0,6
4	ГЖ	7	5	1,4	0,8
5	КШС	6	4	1,0	0,6
6	КШС	5	4	0,8	0,6

После нормализации структура стали представляет собой тонкопластинчатый перлит и небольшие выделения вторичного цементита. В плавках КШС колонии перлита имеют меньшие размеры; в остальных плавках они практически одинаковы. Закалка приводит к образованию мартенсита, остаточного аустенита и глобулей цементита. Как и следовало ожидать, более мелкоигольчатый мартенсит наблюдался в плавках на шихте КШС.

В нормализованном состоянии пластические и прочностные свойства стали опытных плавок практически не различались. В результате отжига снизился уровень прочностных характеристик стали и улучшились пластические свойства (особенно заметно у плавок ГЖ). Ударная вязкость плавок на шихте КШС была примерно вдвое больше, чем у стали ОМШ и ГЖ. После закалки и низкого отпуска опытные плавки имели различную ударную вязкость: 0,07...0,1 МДж/м² (КШС) и 0,03...0,04 МДж/м² (ОМШ и ГЖ). После за-

калки и высокого отпуска пластические свойства заметно улучшились, причем в большей степени у металла на первородной шихте. Одновременно металл КШС обладал и более высокими значениями прочностных и вязкостных характеристик. Серийные испытания на ударный изгиб при пониженных температурах (рис. 3) выявили очень высокие показатели ударной вязкости металла плавок на полупродукте КШС в интервале температур от +20 до –80 °С.

Исследование влияния способа выплавки стали на сопротивляемость водородному растрескиванию (см. табл. 6) позволило установить, что длительная прочность во многом зависит от режимов термической обработки и от чистоты стали. Более чистая сталь обладает большей стойкостью против водородного растрескивания и, следовательно, большей долговечностью в процессе эксплуатации [1, 5, 6]. Использование углеродистых сталей, выплавляемых на ГЖ, для изготовления деталей и металлических конструкций позволит увели-

чить их срок службы по сравнению с аналогичными сталями, полученными обычными способами [5].

Эксплуатационные характеристики опытных сталей как инструментального материала изучали в условиях производственных испытаний готового штампового инструмента.

Сравнительным испытаниям подвергали две партии матриц из восьми, изготовленных из плавок № 4 на ГЖ и

№ 1 на ОМШ-1 стали У10А и прошедших термическую обработку (на 61...63 HRC). Эти матрицы были предназначены для формовки вкладышей подшипников скольжения к двигателям внутреннего сгорания. Стойкость матриц из стали на основе первородной шихты до полного износа составила 190...370 тыс. ударов, а из стали обычной выплавки – 100...200 тыс. ударов.

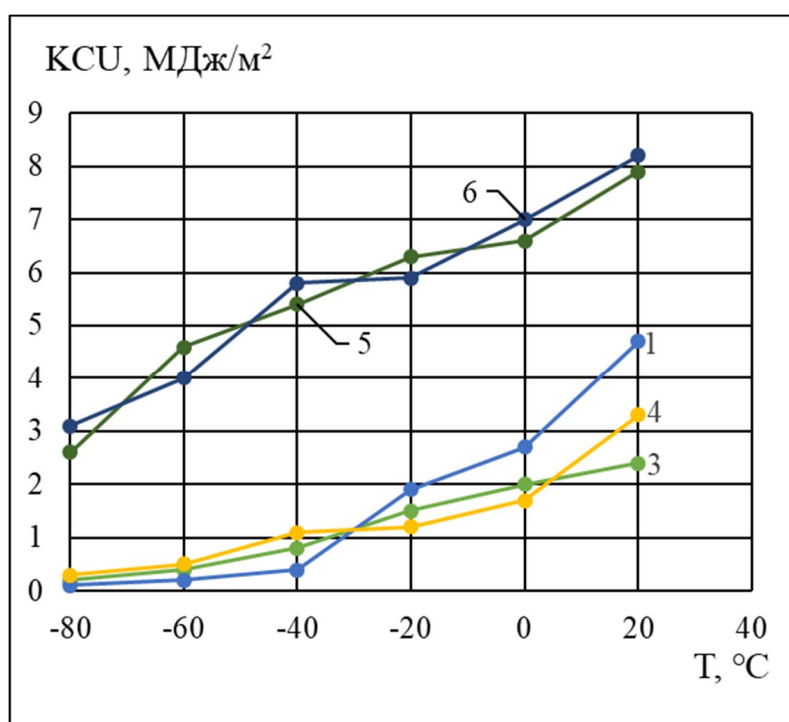


Рис. 3. Ударная вязкость исследованных плавок стали У10А, подвергнутых закалке и высокому отпуску (у кривых указаны номера плавок)

Fig. 3. Impact strength of the studied melts of steel U10A, subjected to hardening and high tempering (the numbers of the melts are indicated on the curves)

Таким образом, приведенные результаты комплексного исследования физико-механических свойств опытной стали У10А свидетельствуют о целесообразности использования металлizedованного сырья при производстве высокоуглеродистых сталей и расширении областей их применения.

Выводы

1. Установлено, что использование чистой первородной шихты положительно сказывается на свойствах выплавленного металла. Сталь У10А, выплавленная на первородной шихте, по прочностным характеристикам не усту-

пает стали на ОМШ, превосходя последнюю по пластическим свойствам и особенно по ударной вязкости.

2. Показано, что сталь, выплавленная на первородной шихте, отличается более низким содержанием микропримесей, обладает меньшей устойчивостью к распаду аустенита и более низкой прокаливаемостью. Выявлено, что из-за меньшей устойчивости аустенита сталь, выплавленная на первородной шихте, должна иметь более высокую критическую скорость закалки, что следует учитывать при выборе режимов термообработки.

3. Установлено, что длительная прочность стали У10А в среде, вызывающей водородное растрескивание, во многом зависит от режимов термической обработки и от чистоты стали. Более чистая сталь обладает большей стойкостью против водородного растрескивания и, следовательно, большей долговечностью в процессе эксплуатации.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [8-30].

Список литературы

1. Влияние качества шихты на чувствительность стали 30ХГСА к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 37-48.
2. Гуляев А.П. Чистая сталь. М.: Металлургия, 1975. 184 с.
3. Мартынов О.В., Свободов А.Н., Лещенко И.П. Влияние первородной шихты на свойства конструкционных сталей // Сталь. 1971. № 12.
4. Марченко В.Н., Литвиненко Д.А., Моргалев Б.Н. Свойства стали 18Х2Н4ВА, выплавленной на первородной и обычной шихте // Сталь. 1977. № 7.
5. Физико-механические характеристики стали У10А разных способов выплавки / В.Т. Терещенко, Н.Н. Сергеев, Е.В. Тинькова, Ю.Т. Дадешкелиани // Сталь. 1987. № 2. С. 86-90.
6. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-воТулГУ, 2018. 430 с.
7. Влияние качества шихты и температуры отжига на формирование зеренной структуры аустенита в стали 30ХГСА / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 2(31). С. 8-26.

8. Влияние условий отпуска на механические и коррозионные свойства стали 23Х2Г2Т / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 128-135.

9. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 409-442.

10. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

11. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 67-83. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2018-22-3-67-83>.

12. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 2(77). С. 52-63. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2018-22-2-52-63>.

13. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

14. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

15. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

16. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

17. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. II (обзор) / Сергеев Н.Н., А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 4. С. 20-29.

18. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2017. № 12. С. 18-25.

19. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // *Технология металлов*. 2015. № 11. С. 17-29.

20. Влияние разнотермности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // *Материаловедение*. 2014. № 7. С. 23-26.

21. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // *Материаловедение*. 2015. № 1. С. 15-21.

22. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

23. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

24. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

25. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2017-21-6-85-95>.

26. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

27. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // *Сталь*. 2017. № 6. С. 26-39.

28. Современные проблемы технических наук / Н.Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, Ю. С. Дорохин, П. Н. Медведев. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2016. 120 с.

29. О состоянии предпревращения металлов и сплавов / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

30. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

References

1. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementyev D. S. Vliyanie kachestva shikhty na chuvstvitel'nost' stali 30KhGSA k vodorodnomu rastreskivaniyu [Influence of charge quality on sensitivity of 30xgsa steel to hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 37-48 (In Russ.).

2. Gulyaev A. P. *Chistaya stal'* [Pure steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 184 p. (In Russ.).

3. Martynov O. V., Svobodov A. N., Leshchenko I. P. Vliyanie pervorodnoi shikhty na svoistva konstruktsionnykh stalei [Influence of the original charge on the properties of structural steels]. *Stal = Steel*, 1971, no. 12 (In Russ.).

4. Marchenko V. N., Litvinenko D. A., Morgalev B. N. Svoistva stali 18Kh2N4VA, vyplavlennoi na pervorodnoi i obychnoi shikhte [Properties of steel 18X2H4VA, smelted on the original and conventional charge]. *Stal = Steel*, 1977, no. 7 (In Russ.).

5. Tereshchenko V. T., Sergeev N. N., Tinkova E. V., Yu. T. Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki stali U10A raznykh sposobov vyplavki [Dadeshkeliani Physical and mechanical characteristics of steel U10A different ways of smelting]. *Stal = Steel*, 1987, no. 2, pp. 86-90 (In Russ.).

6. Sergeev N. N., Sergeev A. N. *Mekhanicheskie svoistva i vnutrennee trenie vysokoprochnnykh stalei v korrozionnykh sredakh* [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. Tula, 2018, 430 p. (In Russ.).

7. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Minaev I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementyev D. S. Vliyanie kachestva shikhty i temperatury otzhiga na formirovanie zerennoi struktury austenita v stali 30KhGSA [Influence of charge quality and annealing temperature on the formation of austenite grain structure in 30xgsa steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceed-*

ings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 8-26 (In Russ.).

8. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E. Vliyanie uslovii otpuska na mekhanicheskie i korrozionnye svoistva stali 23Kh2G2T [Influence of tempering conditions on mechanical and corrosion properties of steel 23X2G2T]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva* = *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy*. P. A. Solovyov, 2018, no. 2 (45), pp. 128-135 (In Russ.).

9. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Pantyukhin O. V. Vliyanie khimicheskogo sostava stali 23Kh2G2T na stoikost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Influence of chemical composition of steel 23X2G2T on resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = *Proceedings of the Tula State University. Technical science*, 2018, vol. 9, pp. 409-442 (In Russ.).

10. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchikh napryazhenii na dlitel'nuyu prochnost' armaturnykh staley v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

11. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klementyev D. S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobrazuyushchikh vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednykh splavov [Application of manufacturing technology "cortical" method of forming inserts for injection molding of copper alloys]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 67-83 (In Russ.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2018-22-3-67-83>.

12. Sergeev N.N., Izvolsky V.V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klementyev D. S. Vliyanie mikrostrukturnykh faktorov i termicheskoi obrabotki na korrozionnuyu stoikost' armaturnoi stali klassa A600 [Influence of microstructural factors and heat treatment on corrosion resistance of reinforcing steel class A600]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 2 (77), pp. 52-63 (In Russ.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2018-22-2-52-63>.

13. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A. D., Sergeev N. N., Kuzovleva O. V., Starikov N. E., Maliy D. V. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh*

nanomaterialov [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016, 235 p. (In Russ.).

14. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A. Vliyanie deformatsionnoi povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskikh svoistv malouglerodistykh staley [Influence of deformation damage on formation of mechanical properties of low-carbon steels]. *Proizvodstvo prokata = Production of Rolled Products*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

15. Baranov V. P., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev N. N., Chukanov A. N. Mnogourovnevnyi podkhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnykh konstruktsionnykh staley pod deistviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

16. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Part I (review). *Materialovedenie = Materials science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

17. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Part II (review). *Materialovedenie = Materials science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

18. Sergeev N.N., Tereshin V. A., Chukanov A. N., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A., Sergeev A. N., Leontiev I. M., Honelidze D. M., Gvozdev A. E. Formirovanie plasticheskikh zon okolo sfericheskoi polosti v uprochnennykh nizkouglerodistykh stalyakh v usloviyakh vodorodnoi stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

19. Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M., Kolmakov A. G. Formirovanie mekhanicheskikh svoistv uglerodistykh staley v protsessakh vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Technology of metals*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

20. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. Vliyanie raznoznernosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [The effect of austenite grain diversity on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

21. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov vtorogo roda [The role of the process of nucleation in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

22. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

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

24. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii [Decision-making on statistical models in product quality management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92 (In Russ.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

25. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruktsionnykh stalei [Diffusion of hydrogen in welded joints of structural steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2017, vol. 21, no. 6(75), pp. 85-95 (In Russ.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2017-21-6-85-95>.

26. Gvozdev A. E., Sergeyev N. N., Minayev I. V., Tikhonova I. V., Sergeyev A. N., Khonelidze D. M., Maliy D. V., Golyshev I. V., Kolmakov A. G., Provotorov D. A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

27. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Cheglov A. E., Sergeev N. N., Gubanov O. M. Variant opredeleniya maksimal'nogo plasticheskogo uprochneniya v instrumental'nykh stal'yakh [Variant of determination of maximum plastic hardening in tool steels]. *Stal' = Steel*, 2017, no. 6, pp. 26-39 (In Russ.).

28. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Dorokhin Yu. s., Medvedev P. N. *Sovremennye problemy tekhnicheskikh nauk* [Modern problems of technical Sciences]. Tula, 2016, 120 p. (In Russ.).

29. Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E., Tikhonov I. V., Sergeev N. N., Breki A. D., Starikov N. E., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Maliy D. V., Titova Yu. E., Alexandrov S. E., Krylov N. A. *O sostoyanii predprevrashcheniya metallov i spлавov* [On the state of pre-conversion of metals and alloys]. Tula, 2016, 245 p. (In Russ.).

30. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E. *Plasticheskaya dilatatsiya i deformatsionnaya povrezhdaemost' metallov i spлавov* [Plastic dilatancy and deformation damage of metals and alloys]. Tula, 2014, 114 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергеев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Nikolay N. Sergeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: ansergueev@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Candidate of Pedagogical Sciences, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Минаев Игорь Васильевич, генеральный директор ООО НПП «Телар», Тула, Российская Федерация, e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Igor V. Minaev, General Director of the Research and Production Enterprise Telar LLC, Tula, Russian Federation, e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdew, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

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

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

Клементьев Денис Сергеевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Denis S. Klement'yev, Undergraduate, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Кругляков Олег Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: krug_ov@yandex.ru

Oleg V. Kruglyakov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: krug_ov@yandex.ru

СТРОИТЕЛЬСТВО

CONSTRUCTION

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-77-89>

Комплексное восстановление нормативного технического состояния керамзитобетонных панелей промышленных зданий, имеющих моральный и физический износ

С.В. Дубраков ¹ ✉, А.В. Масалов ¹, И.В. Завалишин ¹

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

✉ e-mail: sirius080993@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – определение категории технического состояния строительных конструкций для оценки остаточного ресурса и срока службы объектов промышленности и городской инфраструктуры. Разработка принципиального технического решения задачи комплексного восстановления работоспособного технического состояния ограждающих конструкций зданий, включающего обеспечение механических и теплотехнических требований.

Методы. Согласно действующим нормативным требованиям для зданий, введенных в эксплуатацию, необходимо проводить обследование технического состояния не реже одного раза в 10 лет. При проведении технического обследования здания, находящегося по адресу Курская область, район Курчатовский, поселок К. Либкнехта, улица Мира, 1, были выявлены существенные дефекты и повреждения, влияющие на техническое состояние ограждающих строительных конструкций.

Результаты. По результатам исследований был установлен ряд факторов, которые необходимо устранить. Приведены и подробно описаны пути решения выявленных проблем и дефектов, связанных с ограждающими конструкциями, для восстановления здания в надлежащее положение.

Заключение. При проведении работ по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений необходимо уделять внимание не только усилению строительных конструкций, но и восстановлению теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и приведению их в соответствие с требованиями действующих нормативных документов. Для выполнения этой задачи разработана конструкция усиления, создающая необходимое усиление и приводящая теплотехнические характеристики ограждающей конструкции в соответствие с современными требованиями для обеспечения необходимой энергоэффективности ограждающей конструкции.

Ключевые слова: усиление; обследование; энергоэффективность; теплотехнические характеристики; техническое состояние.

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

© Дубраков С.В., Масалов А.В., Завалишин И.В., 2019

Для цитирования: Дубраков С.В., Масалов А.В., Завалишин И.В. Комплексное восстановление нормативного технического состояния керамзитобетонных панелей промышленных зданий, имеющих моральный и физический износ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 77-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-77-89>.

Поступила в редакцию 18.10.2019

Подписана в печать 29.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Comprehensive Restoration of the Normative Technical Condition of Expanded Clay Concrete Panels of Industrial Buildings with Moral and Physical Wear

Sergey V. Dobrakov ¹, Aleksandr V. Masalov ¹, Ilya V. Zavalishin ¹

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

✉ e-mail: sirius080993@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is determining the category of technical condition of building structures to assess the residual resource and service life of industrial facilities and urban infrastructure. Development of a fundamental technical solution to the problem of comprehensive restoration of a workable technical condition of building envelopes, including the provision of mechanical and heat engineering requirements.

Methods. According to the current regulatory requirements for buildings put into operation, it is necessary to conduct an engineering survey at least once every 10 years. During the engineering survey of the building located at Kursk region, Kurchatovsky district, K. Libknekhta village, ul. Mira 1, significant defects and damages affecting the technical condition of the building envelope were revealed.

Results. According to the results of studies, some factors were identified that need to be eliminated. The ways of solving the identified problems and defects associated with the building envelope are given and described in detail to restore the building to its proper position.

Conclusion. When conducting surveys of building structures of buildings and structures, it is necessary to pay attention not only to strengthening building structures, but also to restoring the thermal characteristics of building envelopes and bringing them into line with the requirements of current regulatory documents. To accomplish this task, a reinforcement design has been developed that creates the necessary reinforcement and brings the thermal characteristics of the building envelope in line with modern requirements to ensure the necessary energy efficiency of the building envelope.

Keywords: reinforcement; survey; energy efficiency heat engineering characteristics; technical condition.

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

For citation: Dubrakov S. V., Masalov A.V., Zavalishin I. V. Comprehensive Restoration of the Normative Technical Condition of Expanded Clay Concrete Panels of Industrial Buildings with Moral and Physical Wear. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 77-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-77-89>.

Received 18.10.2019

Accepted 29.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Главной целью при выполнении обследования зданий и сооружений является определение категории технического состояния строительных конструкций. Необходимость данных исследований связана с оценкой остаточного ресурса и срока службы объектов промышленности и городской инфраструктуры. При выполнении комплексного обследования строительных конструкций здания, расположенного в Курчатовском районе Курской области, в поселке имени К. Либкнехта, были выявлены существенные дефекты и повреждения, влияющие на техническое состояние рассматриваемых конструкций.

Материалы и методы

Обследование технического состояния зданий и сооружений необходимо для определения остаточного ресурса и срока службы строительных конструкций зданий и сооружений¹. Согласно действующим нормативным требованиям для зданий, введенных в эксплуатацию, необходимо проводить обследование технического состояния не реже одного раза в 10 лет².

При проведении комплексного технического обследования производст-

венных зданий в Курской области, 1970 года постройки, с железобетонным каркасом и навесными ограждающими панелями из керамзитобетона, были выявлены критические дефекты и повреждения, влияющие на техническое состояние ограждающих конструкций. Указанные дефекты и повреждения следовало устранить для приведения конструкций в работоспособное состояние.

При обследовании здания было выявлено:

- 1) коррозионное повреждение закладных деталей навесных керамзитобетонных панелей;
- 2) разрушение защитного слоя навесных керамзитобетонных панелей с оголением арматуры;
- 3) отклонение от проектного положения в плоскости стены керамзитобетонных панелей в местах крепления от 10 до 20 мм.

При проведении обследования здания [1-7], был произведен поверочный расчёт вертикальной ограждающей конструкции согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»³.

Стены здания выполнены из керамзитобетонных панелей толщиной 200 мм.

Результаты и их обсуждение

По результатам теплотехнического расчета величина приведённого сопротивления теплопередаче R_0^{np} меньше тре-

¹ СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2004.

² ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014.

³ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012.

буемого $R_0^{\text{норм}}$ на 67% ($0,38 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт} < < 1,18 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$).

По результатам обследования, включающего анализ проектной документации и оценку дефектов и повреждений, сформулированы задачи по приведению конструкций в работоспособное состояние [8-14]:

- выполнить усиление конструкций крепления к колоннам керамзитобетонных панелей и витражей;

- произвести утепление по принципу вентилируемого фасада в соответствии с разработанными предложениями.

Выполняя указанные задачи необходимо:

- усилить детали крепления существующей ограждающей конструкции;
- разработать перекрёстную стержневую систему для обеспечения пространственной жесткости;
- произвести утепление ограждающих конструкций.

Для решения первой задачи предложено поставить металлические стойки из профильной трубы квадратного сечения 120х6 с шагом 6 м на отдельные фундаменты глубиной заложения 1,2 м (рис. 1).

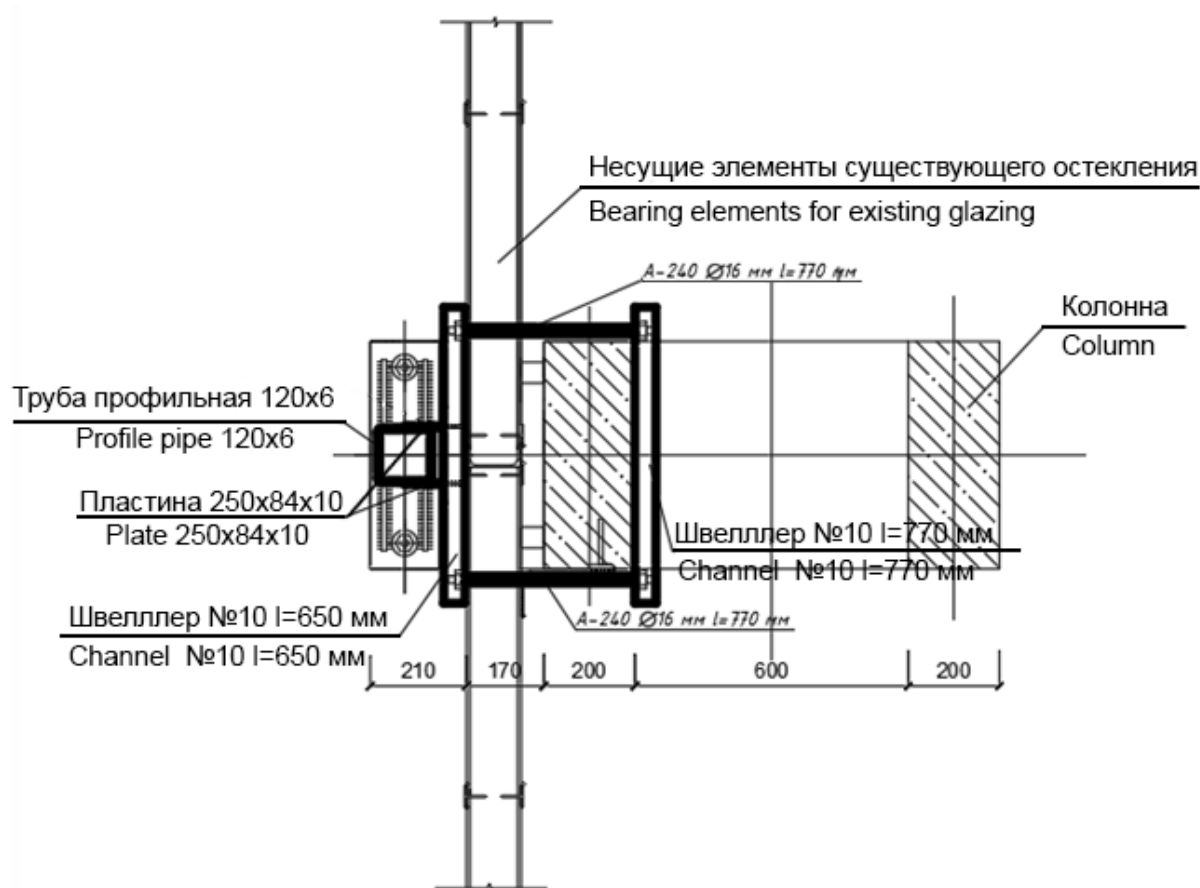


Рис. 1. Схема усиления крепления керамзитобетонных панелей

Fig. 1. Scheme of reinforcements the mount of expanded clay concrete panels

Для соединения металлической стойки с ограждающей панелью и существующей железобетонной двухветвевой колонной наваривается швеллер №12. Через керамзитобетонные панели сверлятся отверстия, через них вставляются отрезки гладкой стержневой арматуры диаметром 20 мм с резьбой на концах. Посредством отрезков швеллеров №10 с внутренней и внешней сторон стены стальная стойка, ограждающие панели и железобетонная колонна стягиваются между собой.

Для создания каркаса для вентилируемого фасада необходимо смонтировать между соседними стойками швеллер №12 с шагом 1200 мм по вертикали.

Между швеллерами выполнить решетку под углом 25 градусов. С наружной стороны решетка выполняется из уголка 50х50х5, с внутренней – из полосы толщиной 10 мм шириной 100 мм. Решетка будет обеспечивать пространственную жесткость (рис.2, 3).

Для обеспечения требований по теплопередаче был произведен расчет ограждающей конструкции стены, схема которой показана на рис.4.

Выполненный расчёт показал величину приведённого сопротивления теплопередаче $R_{0пр} > R_{0норм}$ ($1,66 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт} > 1,18 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$) [15-20], откуда можно сделать вывод, что ограждающая конструкция соответствует требованиям по теплопередаче.

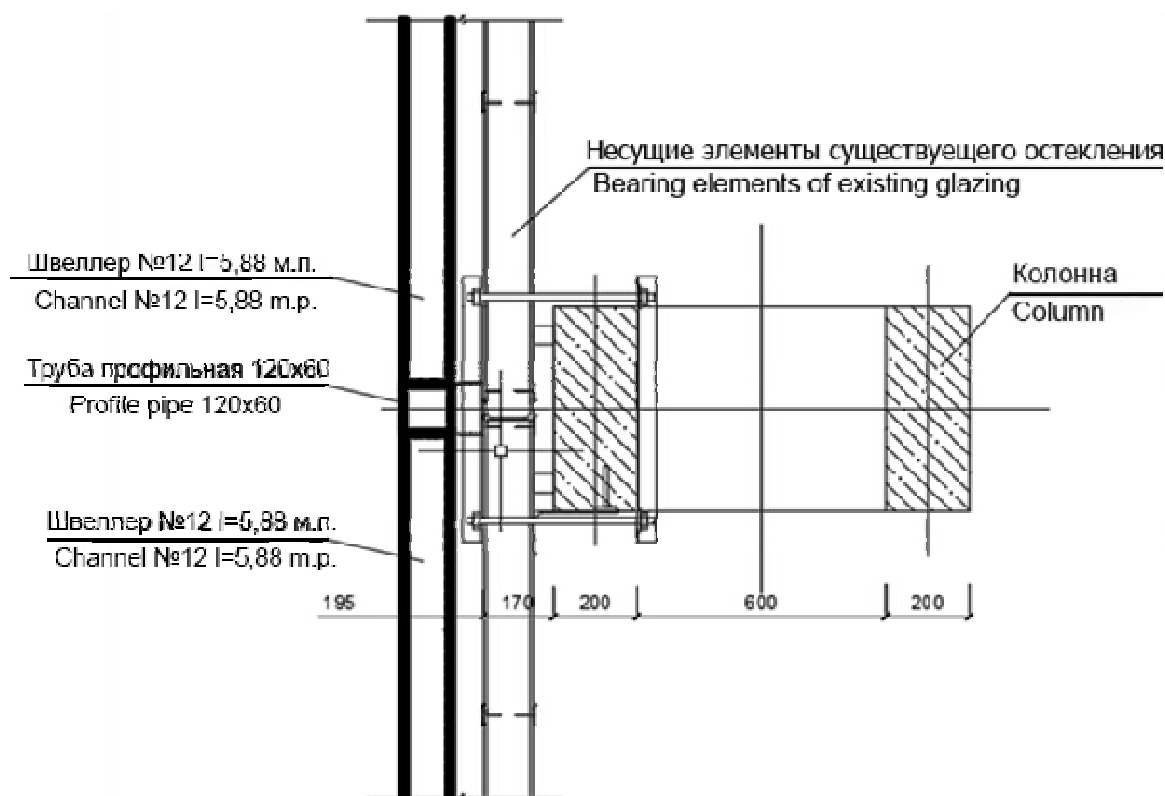


Рис. 2. Схемы направляющих для крепления утеплителя

Fig. 2. Schemes of guides for fixing the insulation

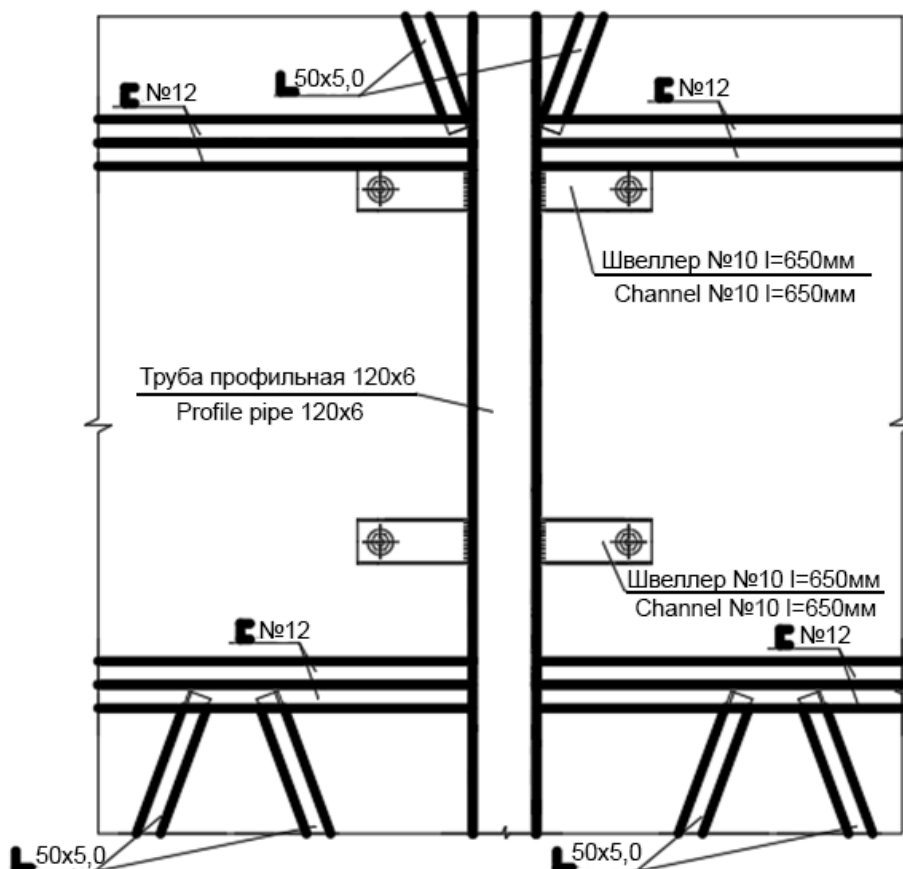


Рис. 3. Схема расположения обрешётки для укладки утеплителя

Fig. 3. Layout of the crate for laying insulation

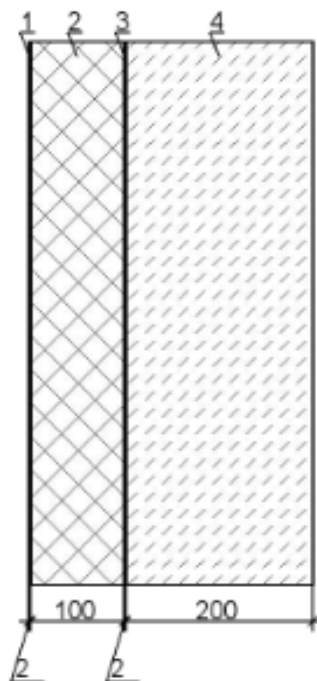


Рис. 4. Схемы ограждающих конструкций после усиления

Fig. 4. Schemes of building envelopes after reinforcement

При утеплении фасадов необходимо на первом этапе заложить полужёсткий - жёсткий минераловатный утеплитель толщиной 100 мм с коэффициентом теплопроводности $0,035 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ со слоями пароизоляции и ветрозащиты согласно схеме рис.4. На втором этапе

смонтировать вертикальные направляющие из стального оцинкованного профиля с шагом, соответствующим ширине профильного листа для его крепления. На третьем этапе закрепить профлист (рис. 5).

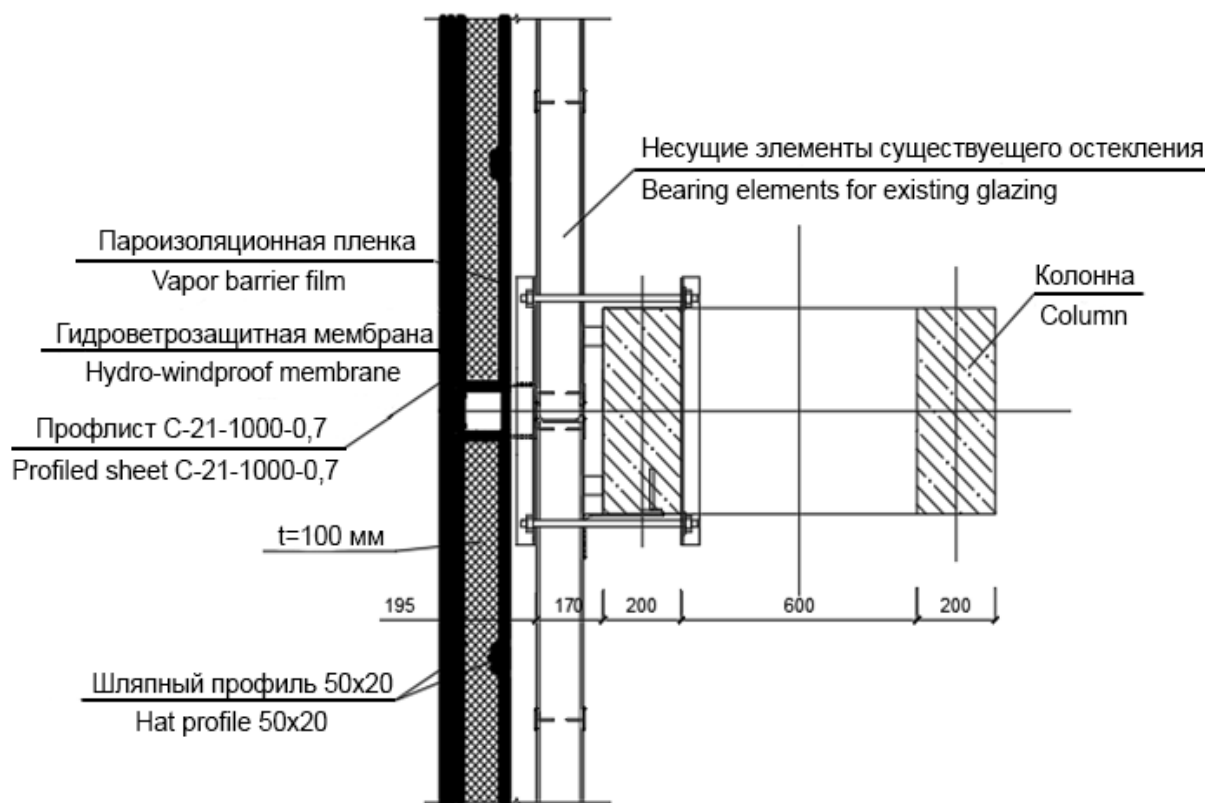


Рис. 5. Схема монтажа вентилируемого фасада

Fig. 5. Installation diagram of ventilated facade

Выводы

При проведении работ по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений необходимо уделять внимание не только усилению строительных конструкций, но и восстановлению теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и приведе-

нию их в соответствие с требованиями действующих нормативных документов. Для выполнения этой задачи разработана конструкция усиления, создающая необходимое усиление и приводящая теплотехнические характеристики ограждающей конструкции в соответствие современным требованиям для обеспечения необходимой энергоэффективности ограждающей конструкции.

Список литературы

1. Теоретическое исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций зданий после реконструкции / С.В. Дубраков, О.И. Куценко, В.В. Андриенко, Н.В. Афанасьева, Д.Х. Галаева // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции: в 2 ч. Вологда: Научный центр «Диспут», 2016. С. 36-38.
2. Казачек В.Г. Проблемы нормирования сроков службы зданий и сооружений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2010. № 6. С. 56-71.
3. Оценка технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 70-75.
4. Добромислов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. М.: АСВ, 2008. 72 с.
5. Федюшкин А.Н. Диагностика технического состояния строительных конструкций как основа безопасной эксплуатации зданий и сооружений // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 26 частях. Тамбов, 2013. С. 147-148.
6. Обследование конструкций зданий и сооружений / Р.Ф. Джео, С.В. Жерновой, А.А. Солдатов, А.В. Дунаенко // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции : в 3 ч. Пенза, 2019. С. 97-99.
7. Критерии технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда городов центральной России, Украины и Беларуси: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного архитектора РФ В.Н. Городкова. Брянск, 2014. С. 177-182.
8. Гарькина И.А., Гарькин И.Н. Из опыта обследования строительных конструкций объектов агропромышленного комплекса // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 3. № 6. С. 110-114.

9. Дувалина А., Мартюшев А., Оспищев И. Использование косвенных методов неразрушающего контроля прочности бетона и материалов кирпичной кладки при обследовании зданий и сооружений // Регламент. 2015. № 5 (43). С. 126-127.

10. Рыбалко А.С., Коженко Н.В. Обследование и реконструкция зданий и сооружений // Актуальные вопросы экономики и технологического развития отраслей народного хозяйства: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов, магистрантов и преподавателей. Майкоп, 2016. С. 151-156.

11. Родин А.И., Неверов А.Н. Обследование элементов зданий и жилого кирпичного дома в Москве // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы четырнадцатой Международной научно-технической конференции: в 2 ч. / отв. редактор В. Т. Ерофеев. Саранск, 2015. С. 212-217.

12. Героев А.Е., Вонгай А.О. Энергетические обследования зданий и сооружений // Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства: материалы международной научно-практической конференции. Ростов, 2014. С. 233-234.

13. Живенко А.В., Пожидаев Б.В., Живенко В.А. Типичные проектные ошибки, выявленные при обследованиях зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 1. С. 72-74.

14. Бабусенко М.С. Некоторые задачи, решаемые при обследовании зданий в условиях городской застройки // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2 (6). С. 47-50.

15. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7 (25). С. 3-10.

16. Якубсон В.М. Обследование зданий и сооружений: наука и практика // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 3-4.

17. Соколова О.В., Чечель М.В. Особенности обследования зданий городской застройки // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 7-2. С. 92-95.

18. Гарькина И.А., Гарькин И.Н., Ключев С.В. Необходимый уровень квалификации специалистов по обследованию зданий и сооружений // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 1. С. 36-39.

19. Шеин А.И., Бакушев С.В., Зернов В.В. Опыт обследования зданий и сооружений // Моделирование и механика конструкций. 2017. № 5. С. 16.

20. Ермошенко Н.С. Современные методы обследования зданий городской застройки // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 24-2. С. 26-27.

References

1. Dubrakov S. V., Kutsenko O. I., Andriyenko V. V., Afanasyeva N. V., Galaev D. X. Teoreticheskoe issledovanie teplotekhnicheskikh svoystv ograzhdayushchikh konstrukttsii zdaniy posle rekonstrukttsii [Theoretical study of thermal properties of enclosing structures of buildings after reconstruction]. *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science today: problems and prospects of development. Materials of the international scientific and practical conference]. Vologda, Nauchnyi tsentr "Disput" Publ., 2016, pp. 36-38 (In Russ.).
2. Kazachek V. G. Problemy normirovaniya srokov sluzhby zdaniy i sooruzheniy [Problems of standardization of service life of buildings and structures]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki = Bulletin of Polotsk state University. The F-Series: Construction. Applied science*, 2010, no. 6, pp. 56-71 (In Russ.).
3. Smorchkov A. A., Kereb S. A., Orlov D. A., Baranovskaya K. O. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stroitel'nykh konstrukttsii zdaniy i sooruzheniy [Assessment of the technical condition of the operated building structures of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Civil engineering journal*, 2012, no. 7 (33), pp. 70-75 (In Russ.).
4. Dobromyslov A. N. *Otsenka nadezhnosti zdaniy i sooruzheniy po vneshnim priznakam* [Assessment of reliability of buildings and structures on external signs]. Moscow, ASV Publ., 2008, 72 p. (In Russ.).
5. Fedyushkin A. N. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstrukttsii, kak osnova bezopasnoi ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy [Diagnostics of technical condition of building structures, as a basis for safe operation of buildings and structures]. *Sovremennyye tendentsii v obrazovanii i nauke. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Modern trends in science and education. Collection of scientific works on materials of the International scientific-practical conference]. Tambov, 2013, pp. 147-148 (In Russ.).
6. Jeo R. F., Zhernovoy S. V., Soldatov A. A., Dunaenko A.V. Obsledovanie konstrukttsii zdaniy i sooruzheniy [Survey of structures of buildings and structures]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statei XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Collection of ar-

ticles XXIII International scientific and practical conference: "Fundamental and applied research: current issues, achievements and innovations"]. Penza, 2019, pp. 97-99 (In Russ.).

7. Smirnov A. A., Cereb S. A., Orlov D. A., Baranovskaya O. K. Kriterii tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stroitel'nykh konstruksii zdaniy i sooruzhenii [Criteria for the technical condition of building structures of operated buildings and structures]. *Arkhitektura, gradostroitel'stvo, istoriko-kul'turnaya i ekologicheskaya sreda gorodov tsentral'noi Rossii, Ukrainy i Belarusi. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati zaslužennogo arkhitekta RF V.N. Gorodkova* [Collection International scientific-practical conference devoted to memory of honoured architect of Russia V. N. Gorodkov: "Architecture, urban planning, historical-cultural and ecological environment of the cities of Central Russia, Ukraine and Belarus"]. Bryansk, 2014, pp. 177-182 (In Russ.).

8. Garkina I. A., Garkin I. N. Iz opyta obsledovaniya stroitel'nykh konstruksii ob'ektov agropromyshlennogo kompleksa [From the experience of inspection of building structures of objects of agro-industrial complex]. *Uspekhi sovremennoi nauki i obrazovaniya* = *Successes of modern science and education*, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 110-114 (In Russ.).

9. Duvalina A., Martyushev A., Ospishchev I. Ispol'zovanie kosvennykh metodov nerazrushayushchego kontrolya prochnosti betona i materialov kirpichnoi kladki pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenii [The use of indirect methods of non-destructive testing of concrete strength and brickwork materials in the survey of buildings and structures]. *Reglament* = *Regulations*, 2015, no. 5 (43), pp. 126-127 (In Russ.).

10. Rybalko A. S., Kozhenko N. V. Obsledovanie i rekonstruktsiya zdaniy i sooruzhenii [Survey and reconstruction of buildings and structures]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i tekhnologicheskogo razvitiya otraslei narodnogo khozyaistva. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, magistrantov i prepodavatelei* [Collection materials of regional scientific and practical conference of students, postgraduates, undergraduates and teachers "Actual questions of economy and technological development of branches of national economy"]. Maikop, 2016, pp. 151-156 (In Russ.).

11. Rodin A. I., Neverov A. N. Obsledovanie elementov zdaniy i zhilogo kirpichnogo doma v Moskve [Survey of elements of buildings and residential brick house in Moscow]. *Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva. Materialy chetyrnadtsatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Collection materials of the fourteenth International sci-

entific and technical conference "Actual issues of architecture and construction"]. Saransk, 2015, pp. 212-217 (In Russ.).

12. Geroev A. E., Vongay A. O. Energeticheskie obsledovaniya zdaniy i sooruzhenii [Energy surveys of buildings and structures]. *Stroitel'stvo-2014: sovremennyye problemy promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection materials of the international scientific and practical conference "Construction-2014: modern problems of industrial and civil construction"]. Rostov, 2014, pp. 233-234 (In Russ.).

13. Zhivenko A. V., Pozhidaev B. V., Zhivenko V. A. Tipichnye proektnye oshibki, vyavlenyye pri obsledovaniyakh zdaniy i sooruzhenii [Typical design errors identified during inspections of buildings and structures]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Safety in industry*, 2016, no. 1, pp. 72-74 (In Russ.).

14. Babusenko M. S. Nekotorye zadachi, reshaemye pri obsledovanii zdaniy v usloviyakh gorodskoi zastroiki [Some problems solved in the survey of buildings in urban development]. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti = Technologies of civil security*, 2004, no. 2 (6), pp. 47-50 (In Russ.).

15. Orlovich R. B., Derkach V. N. Otsenka prochnosti kladochnykh rastvorov pri obsledovanii kamennykh zdaniy [Assessment of the strength of masonry mortars in the survey of stone buildings]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Civil engineering journal*, 2011, no. 7 (25), pp. 3-10 (In Russ.).

16. Yakubson V. M. Obsledovanie zdaniy i sooruzhenii: nauka i praktika [Inspection of buildings and structures: science and practice]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Civil engineering journal*, 2012, no. 7 (33), pp. 3-4 (In Russ.).

17. Sokolova O. V., Chechel M. V. Osobennosti obsledovaniya zdaniy gorodskoi zastroiki [Features of survey of buildings of city building]. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike = Technical Sciences - from theory to practice*, 2012, no. 7-2, pp. 92-95 (In Russ.).

18. Garkina I. A., Garkin I. N., Klyuev S. V. Neobkhodimyy uroven' kvalifikatsii spetsialistov po obsledovaniyu zdaniy i sooruzhenii [The Necessary level of qualification of specialists in the survey of buildings and structures]. *Uspekhi sovremennoi nauki = Successes of modern science*, 2017, vol. no. 1, pp. 36-39 (In Russ.).

19. Shein A. I., Bakushev S. V., Zernov V. V., Zaitsev M. B. Opyt obsledovaniya zdaniy i sooruzhenii [Experience of inspection of buildings and constructions]. *Modelirovanie i*

mekhanika konstruksii = Modeling and mechanics of structures, 2017, no. 5, pp. 16 (In Russ.).

20. Yermoshenko N. S. *Sovremennye metody obsledovaniya zdaniy gorodskoi zastroiki* [Modern methods of inspection of buildings of city building]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Tendencies of development of science and education*, 2017, no. 24, pt. 2, pp. 26-27 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Sergey V. Dubrakov, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

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

Alexander V. Masalov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Завалишин Илья Владимирович, инженер кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Ilya V. Zavalishin, Engineer, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Расчет осадки однородного основания

Е.Г. Пахомова¹, О.И. Куценко¹ ✉, А.С. Морозова¹, А.Р. Тимохина¹

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

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В данной статье предлагается разработка новой методики определения осадки однородного основания фундамента на базе метода послойного суммирования, позволяющего сократить объем выполняемых вычислений.

Методы. Границу сжимаемой толщи можно определить графически из условия равенства дополнительных напряжений половине природных. Зная значение глубины сжимаемой толщи, можно определить суммарное значение коэффициентов, входящих в известную формулу по расчету осадки основания методом послойного суммирования. Определив значение указанного коэффициента в слое, расположенном непосредственно под подошвой фундамента, введем коэффициент K_α , отражающий долю осадки в рассматриваемом слое.

Результаты. Применение разработанного коэффициента K_α позволяет определить осадку основания, рассчитав деформации одного слоя грунта, расположенного непосредственно под подошвой фундамента, что значительно упрощает проектирование подземных конструкций. В качестве примера рассмотрен фундамент, среднее давление под подошвой которого составляет 1200 кПа, глубина заложения $d=2$ м, основание однородное с модулем деформации 20 МПа и удельным весом $\gamma=18$ кН/м³. Выполнен расчет осадки системы «здание-основание» методом послойного суммирования и разработанным, произведен критический анализ результатов. При расчёте осадки методом послойного суммирования по известным формулам, приведенным в СП 22.13330. 2016 «Основания зданий и сооружений», получено значение осадки равное 9 см. При расчете деформаций основания по предложенной методике графически определена граница сжимаемой толщи $H_c=5,7$ м. Значение коэффициента K_α составило 0,203, осадка – 9 см.

Закключение. Значения осадок, определенных согласно действующим нормативным документам и по разработанной методике, совпадают, что позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый метод обладает достаточной степенью достоверности и может существенно облегчить процесс определения деформаций основания зданий и сооружений.

Ключевые слова: основание; осадка; фундамент; сжимаемая толщина; метод послойного суммирования.

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

Для цитирования: Расчет осадки однородного основания / Е.Г. Пахомова, О.И. Куценко, А.С. Морозова, А.Р. Тимохина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 90-98. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-90-98>.

Поступила в редакцию 18.10.2019

Подписана в печать 20.11.2019

Опубликована 23.12.2019

© Пахомова Е.Г., Куценко О.И., Морозова А.С., Тимохина А.Р., 2019

Settlement Computation of Homogeneous Base

Ekaterina G. Pakhomova¹, Olga I. Kutsenko¹ ✉, Alina S. Morozova¹,
Alina R. Timokhina¹

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

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. This article proposes the development of a new methodology for determining the settlement of a homogeneous foundation base on the basis of the layer-by-layer summation method, which reduces the amount of calculations performed.

Methods. The boundary of the compressible stratum can be determined graphically from the condition that the additional stresses are equal to half the natural stresses. Knowing the value of the depth of the compressible stratum, we can determine the total value of the coefficients included in the well-known formula for calculating the settlement of the base by the method of layer-by-layer summation. Having determined the value of the specified coefficient in the layer located directly below the base of the foundation, we introduce the coefficient $K\alpha$, which reflects the proportion of sediment in the layer under consideration.

Results. The application of the developed coefficient $K\alpha$ allows determining the base settlement by calculating the deformations of one soil layer located directly below the base of the foundation, which greatly simplifies the design of underground structures. As an example, we consider a foundation, the average pressure under the sole of which is 1200 kPa, the laying depth $d = 2$ m, the base is homogeneous with a deformation modulus of 20 MPa and a specific gravity of $\gamma = 18$ kN / m³. The settlement of the building-basement system was calculated by the method of layer-by-layer summation and the critical analysis of the results was performed. When calculating precipitation by the method of layer-by-layer summation according to the known formulas given in SP 22.13330. 2016 "Foundations of buildings and structures", it was obtained a draft value of 9 cm. When calculating the base deformations according to the proposed method, the boundary of the compressible thickness $H_c = 5.7$ m was graphically determined. The coefficient value was 0.203, and the draft was 9 cm.

Conclusion. The settlement values determined in accordance with current regulatory documents and the developed methodology are the same, which allows us to conclude that the proposed method has a sufficient degree of reliability and can significantly facilitate the process of determining the deformations of the base of buildings and structures.

Keywords: base; settlement; foundation; compressible stratum; method of layer-by-layer summation.

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

For citation: Pakhomova E. G., Kutsenko O.I., Morozova A.S., Timokhina A.R. Settlement Computation of Homogeneous Base. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 90-98 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-90-98>.

Received 18.10.2019

Accepted 20.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Для обеспечения требования Федерального закона №384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» необходимо предотвратить деформации недопустимой величины основания здания. Следовательно, проектирование фундаментов должно осуществляться с учетом предельных осадок оснований. В связи с этим вопросу прогноза осадок фундаментов на сжимаемых основаниях, определению их неравномерности и протекания во времени придается первостепенное значение [1, 2, 3-10].

На сегодняшний день существует большое число способов определения совместных деформаций системы «здание-основание». Они отличаются точностью, количеством учитываемых факторов, применяемыми расчетными схемами, допущениями при описании работы грунта¹ [3, 12-14].

В настоящее время осадка основания фундамента согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» определяется методом послойного суммирования с использованием расчетной схемы в виде линейно-деформируемого полупространства по формуле

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} h_i}{E_{e,i}}, (1)$$

где β – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

$\sigma_{zp,i}$ – среднее значение вертикального нормального напряжения (далее – вертикальное напряжение) от внешней нагрузки в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;

h_i – толщина i -го слоя грунта, см, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента;

E_i – модуль деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения;

$\sigma_{zy,i}$ – среднее значение вертикального напряжения в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса выбранного при отрывке котлована грунта;

$E_{e,i}$ – модуль деформации i -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения;

n – число слоев, на которые разбита сжимаемая толща основания.

Сущность метода послойного суммирования заключается в определении осадок элементарных слоев основания в пределах сжимаемой толщи от дополнительных вертикальных напряжений $\sigma_{zp,i}$, возникающих от нагрузок, передаваемых зданиями. Для нахождения средней осадки всего фундамента необходимо выделить ряд вертикальных призм, определить их осадку и найти среднюю арифметическую из найденных величин. Такой способ определения осадки оказывается чрезвычайно громоздким. Следовательно, необходима разработка нового упрощенного метода определения осадки однородного

¹ Ахлюстин О.Е. Закономерности изменчивости физико-механических свойств просадочных грунтов Анапского р-на Краснодарского края: автореф. дис. ... канд. геол.-мин.наук. Екатеринбург, 2013.

основания фундамента на основе метода послойного суммирования, позволяющего сократить объем выполняемых вычислений.

Материалы и методы

Границу сжимаемой толщи можно определить графически из условия:

$$\sigma_{zp} = 0,5 \cdot \sigma_{zg}. \quad (2)$$

С учетом значения вертикальных σ_{zp} и природных σ_{zg} напряжений выражение (2) можно записать в виде

$$\alpha \cdot P = 0,5 \cdot \gamma \cdot (d + z), \quad (3)$$

где z – глубина от подошвы фундамента; d – глубина котлована. Решить уравнение (3) можно графически (рис. 1).

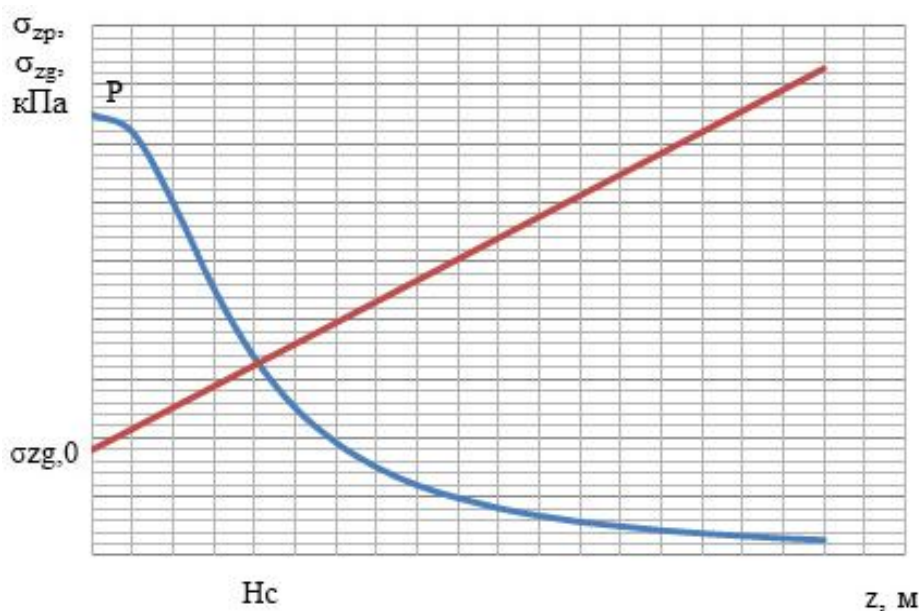


Рис. 1. График распределения вертикальных σ_{zp} и природных σ_{zg} напряжений по глубине z

Fig. 1. Distribution graph of vertical σ_{zp} and natural σ_{zg} tensions over depth z

Зная значение глубины сжимаемой толщи H_c , можно определить суммарное значение коэффициентов $\sum \alpha$, входящих в известную формулу по расчету осадки основания методом послойного суммирования (1). Определив значение указанного коэффициента α_1 в слое толщиной $h = 0,4 \cdot b$, расположенного непосредственно под подошвой фундамента, введем коэффициент K_α , отражающий долю осадки в рассматриваемом слое.

$$K_\alpha = \frac{\alpha_1}{\sum \alpha}, \quad (4)$$

где α_1 – значение коэффициента α для слоя грунта толщиной h , расположенного непосредственно под подошвой фундамента.

Результаты и их обсуждение

С учетом формулы (4) выражение для определения осадки основания (1) можно записать в виде

$$s = \beta \frac{0,4 \cdot b \alpha_1 (\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i})}{K_\alpha E}. \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим фундамент, среднее давление под подошвой которого составляет 1200 кПа, глубина заложения $d=2$ м, основание однородное с модулем деформации 20 МПа и удельным весом $\gamma=18\text{кН/м}^3$. Выполним расчет осадки системы «здание-основание» методом послойного суммирования и методом, представленным в настоящей статье, сравним полученные значения. При расчёте методом послойного суммирования по известным

формулам (1), приведенным в СП 22.13330. 2016 «Основания зданий и сооружений», получено значение осадки равное 9 см.

При расчете осадки основания упрощенным методом графически определяем границу сжимаемой толщи согласно условиям (2) и (3): По данным графика $H_c=5,7$ м (рис. 2.).

Значение коэффициента K_α составило 0,203, осадка – 9 см.

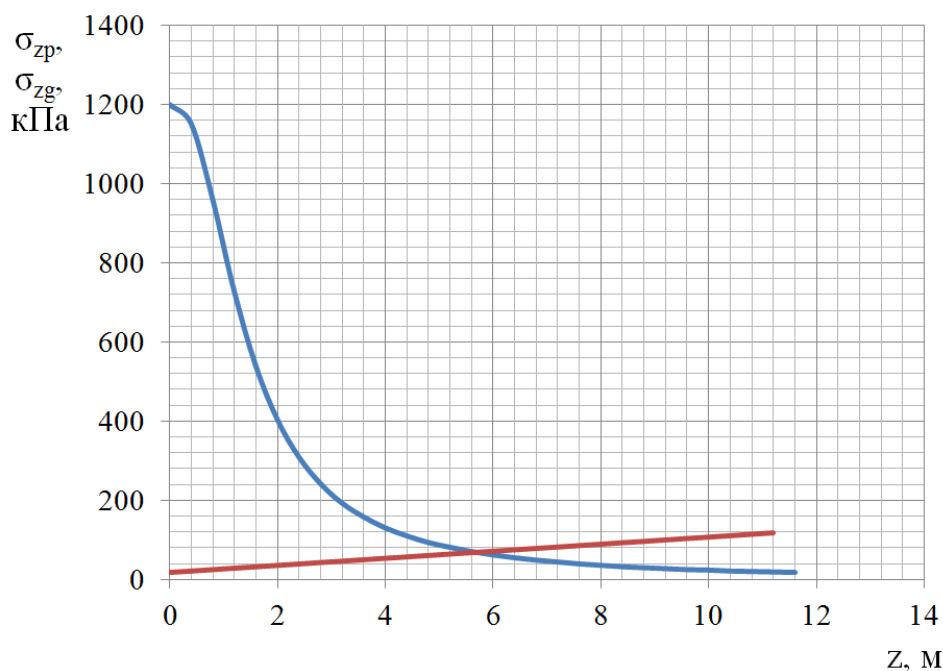


Рис. 2. Графическое определение границы сжимаемой толщи

Fig. 2. Graphic definition of the boundary of the compressible stratum

Выводы

Поскольку значения осадки, определенные согласно действующим нормативным документам и по разработанной методике, совпадают, можно сде-

лать вывод о том, что предлагаемый метод обладает достаточной степенью достоверности и может существенно облегчить процесс определения деформаций основания зданий и сооружений.

Список литературы

1. Nguyen M.D. [et al.] Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression // *Geosynthetics*. 2013. № 20 (3). P. 207–225.
2. Phoon K.-K., Retief J.V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. – Matieland, South Africa, 2016. P. 249.
3. Барановский А.Г. Изменение физико-механических свойств элювиальных глинистых грунтов под влиянием техногенных факторов // *Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: сборник*. М., 2015. С.92-97.
4. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 696 с.
5. Бочарова М.А. Предложения по усовершенствованию расчета осадок фундаментов, учитывающие анизотропные свойства грунтов // *Вестник научных конференций*. 2016. №9-3(13). 22-25 с.
6. Деминцева Е.А., Вайнштейн В.М. Анализ изменения физико-механических свойств грунтов при стабилизации их модификатором «Пенетрон» // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. Пермь, 2013. С.157-162.
7. Дмитриева К.О., Мыльченко А.Ю. Изменение расчётного сопротивления грунта основания эксплуатируемого здания // *Проектирование и строительство*. Курск, 2016. С.19-22.
8. Дмитриева К.О., Дубраков С.В. Механика грунтов. Курск, 2017. 112 с.
9. Дубракова К.О., Куценко О.И., Карцев И.Н. Изменение физико-механических характеристик грунта эксплуатируемого основания // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019. Т.23. №3. С.54-64. <https://doi.org/1021869/2223-1560-2019-23-3-54-64>.
10. Калугин П.И., Пятигор Д.А. Особенности работы грунтов оснований фундаментов после реконструкции зданий // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета* 2017. №1. С.60-64.
11. Расчётный анализ длительного деформирования системы «здание-основание здания» хранилища ядерных отходов АЭС / В.И. Колчунов, В.В. Потапов, К.О. Дмитриева, В.А. Ильин // *Строительство и реконструкция*. 2017. №4(72). С.27-33.
12. Оценка влияния возводимого многоэтажного здания на техническое состояние близлежащих строений / А.А. Краснов, А.Л. Четвериков, С.Г. Шейна, В.Г. Шумеев //

Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии города: сборник материалов III Всероссийской научной конференции. Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. С.3-5.

13. Ширяева М.П., Кривонос Е.А. Классификация моделей грунтового основания // Научные труды КУБГТУ: электронный сетевой политематический журнал. 2014. № 3. С. 18-25.

References

1. Nguyen M.D. [et al.] Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression. *Geosynthetics*, 2013, no. 20 (3), pp. 207–225.

2. Phoon K.-K., Retief J.V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. Matieland, South Africa, 2016, 249 p.

3. Baranovsky A.G. Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv elyuvial'nykh glinistykh gruntov pod vliyaniem tekhnogennykh faktorov [Changes in the physical and mechanical properties of eluvial clay soils under the influence of technogenic factors]. *Sbornik "Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami v sovremennom mire"* [Collection "Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world"]. Moscow, 2015, pp. 92-97 (In Russ.).

4. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa* [Methods for determining the mechanical properties of soils. State of the issue]. Penza, PGUAS Publ., 2014, 696 p. (In Russ.).

5. Bocharova M.A. Predlozheniya po usovershenstvovaniyu rascheta osadok fundamentov, uchityvayushchie anizotropnye svoystva gruntov [Proposals for improving the calculation of sediment foundations, taking into account the anisotropic properties of soils]. *Vestnik nauchnykh konferentsii = Bulletin of scientific conferences*, 2016, no. 9-3(13), pp. 22-25 (In Russ.).

6. Demintseva E.A., Weinstein V.M. Analiz izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov pri stabilizatsii ikh modifikatorom «Penetron» [Analysis of changes in the physical and mechanical properties of soils during stabilization by the Penetron modifier]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and scientific research in the transport complex]. Perm, 2013, pp. 157-162 (In Russ.).

7. Dmitrieva K.O. *Izmenenie raschetnogo soprotivleniya grunta osnovaniya ekspluatiruемого zdaniya* [Change in the calculated soil resistance of the base of the operated building]. *Proektirovanie i stroitel'stvo* [Design and construction]. Kursk, 2016, pp. 19-22 (In Russ.).

8. Dmitrieva K.O., Dubrakov S.V. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Kursk, 2017, 112 p. (In Russ.).

9. Dubrakova K.O., Kutsenko O.I., Kartsev I.N. *Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik grunta ekspluatiruемого osnovaniya* [Changes in the Physic-Mechanical Characteristics of the Soil of the Operated Foundation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(3): pp. 54-64 (In Russ.). <https://doi.org/1021869/2223-1560-2019-23-3-54-64>.

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

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

12. Krasnov A.A., Chetverikov A.L., Sheina S.G., Shumeev V.G. *Otsenka vliyaniya vozvodimogo mnogoetazhnogo zdaniya na tekhnicheskoe sostoyanie blizlezhashchikh stroeniy* [Assessment of the influence of a multi-storey building being built on the technical condition of nearby buildings]. *Problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya i ekologii goroda. Sbornik materialov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii*. [Problems of construction, engineering support and the city ecology. Collection of materials of the III All-Russian Scientific Conference]. Penza, 2001, pp.3-5 (In Russ.).

13. Shiryayeva M.P., Krivonos E.A. *Klassifikatsiya modelei gruntovogo osnovaniya* [Classification of soil foundation models]. *Elektronnyi setevoy politematicheskii zhurnal "Nauchnye trudy KUBGTU" = Electronic network political journal "Scientific works of KUBGTU"*, 2014, no. 3, pp. 18-25 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Пахомова Екатерина Геннадиевна, кандидат технических наук, доцент, декан факультета строительства и архитектуры, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Ekaterina G. Pakhomova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Construction and Architecture, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

Куценко Ольга Ивановна, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Olga I. Kutsenko, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

Морозова Алина Сергеевна, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Alina S. Morozova, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

Тимохина Алина Романовна, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Alina R. Timokhina, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

**Эффективность централизованного использования
цифровых технологий, информационных ресурсов
и средств защиты информации в органах власти
на примере республики Тыва**

Б.С. Донгак¹ ✉, А.С. Шатохин¹, Р.В. Мещеряков²

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Российская Федерация

² ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН»
ул. Профсоюзная, 65, г. Москва, 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: d_n_buyan@list.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является оценка возможности применения методики централизованного управления системами и информационными рисками на примере информатизации органов государственной власти Республики Тыва, в целях оптимизации затрат на приобретение технических, программных и программно-аппаратных средства защиты информации, а также фонда оплаты труда обслуживающего технического персонала.

Методы. Одним из главных методов исследования является создание экспериментальной модели механизма единой информационно-вычислительной сети, объединяющей различные ведомства государственной власти, находящиеся в пределах одного административного здания, позволяющего одновременно работать с распределенными или централизованными приложениями, базами данных и другими сервисами, а также централизованное управления рисками информационной безопасности. Следующим методом исследования является анализ и изучение принципа работы информационных ресурсов, информационных систем, базы данных, и увеличение количества доменных пользователей в случае объединения их в единую сеть передачи данных. Взаимодействие и эффективность персонала, специализированного подразделения на базе одного государственного учреждения, обеспечивающие штатное функционирование сети и необходимый уровень информационной безопасностью для всех ведомств государственной власти.

Результаты. В результате получен экономический эффект за счет исключения приобретения дублирующих программно-аппаратных средств защиты информации, повышения эффективности использования единых информационных сервисов, а также создания централизованного структурного подразделения, которое использует в работе инструменты регулирования рисков и принимает управленческие решения информационной безопасности, основанные на принципах системного анализа, метода структуризации и методов экспертного опроса. Результаты исследования нашли применение при решении задач совершенствования системы управления информационной безопасностью органов власти Республики Тыва.

Заключение. Для органов государственной власти Республики Тыва разработана оригинальная информационно-технологическая архитектура системы управления информационной безопасностью и централизованное использование информационных технологий. Отличительными особенностями структуры программных средств централизованного подхода являются мультиагентная реализация управляющих элементов системы поддержки принятия решений и интеграция различных типов моделей управления безопасностью в единый комплекс.

Ключевые слова: информационные риски; информационная безопасность; органы государственной власти; централизованное управление; мультиагентный подход.

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

Для цитирования: Донгак Б.С., Шатохин А.С., Мещеряков Р.В. Эффективность централизованного использования цифровых технологий, информационных ресурсов и средств защиты информации в органах власти на примере республики Тыва // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 99-114. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-99-114>.

Поступила в редакцию 30.09.2019

Подписана в печать 16.10.2019

Опубликована 23.12.2019

The effectiveness of the Centralized Use of Digital Technologies, Information Resources and Information Protection Tools in Government by the Example of the Republic of Tyva

Buyan S. Dongak ¹✉, Alexander S. Shatokhin ¹, Roman V. Mescheryakov ²

¹ Altai State Technical University named after I.I. Polzunova
46 Lenin Avenue, Barnaul 656038, Russian Federation

² Institute of Control Science of RAS
65 Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: d_n_buyan@list.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to assess the possibility of applying the methodology for centralized management of systems and information risks using the example of informatization of public departments of Republic of Tyva in order to optimize the cost of purchasing technical, software and hardware-software means of protecting information, as well as the payroll of maintenance technical personnel.

Methods. One of the main research methods is the creation of an experimental model of the mechanism of a single information and computing network, combining various government departments located within the same administrative building, which allows working simultaneously with distributed or centralized applications, databases and other services, as well as centralized information risk management security. The next research method is the analysis and study of the principle of operation of information resources, information systems, databases, and the increase in the number of domain users if they are combined into a single data transfer network. The interaction and effectiveness of personnel, a specialized unit based on one government agency, ensuring the regular functioning of the network and the necessary level of information security for all government departments.

Results. As a result, an economic effect is achieved by eliminating the acquisition of duplicate software and hardware information protection, increasing the efficiency of using unified information services, and creating a centralized structural unit that uses risk management tools and makes information security management decisions based on the principles of system analysis, structuring method and expert survey methods. The results of the study

have been used in solving problems of improving the information security management system of the authorities of Republic of Tyva.

Conclusion. We have developed the original information technology architecture of the information security management system and centralized use of information technologies for the government of Republic of Tyva. The distinctive features of the structure of software tools for the centralized approach are the multi-agent implementation of the control elements of the decision support system and the integration of various types of security management models into a single complex.

Keywords: information risks; information security; government departments; centralized management; multi-agent approach.

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

For citation: Dongak B. S., Shatokhin A. S., Mescheryakov R. V. The effectiveness of the centralized use of digital technologies, information resources and information protection tools in government by the example of the Republic of Tyva. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 99-114 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-99-114>.

Received 28.06.2019

Accepted 15.08.2019

Published 25.10.2019

Введение

В соответствии со Стратегией национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683, одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности в сфере информационных технологий (далее – ИТ) является повышение уровня технологической безопасности, в том числе в информационной сфере. ИТ приобрели глобальный трансграничный характер и стали неотъемлемой частью всех сфер деятельности личности, общества и государства. Их эффективное применение является фактором ускорения экономического развития региона и формирования информационного общества. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Россий-

ской Федерации на период до 2024 года» Правительству Российской Федерации при реализации совместно с органами государственной власти субъектов Российской Федерации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» необходимо обеспечить в 2024 году достижение основных целей и целевых показателей, таких как: создание устойчивой и безопасной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры высокоскоростной передачи данных, обработки и хранения больших объемов данных, доступной для всех организаций, и использование преимущественно отечественного программного обеспечения государственными органами, органами местного самоуправления и организациями. Однако существует и ряд вопросов, которые необходимо решить для обеспечения функционирования систе-

мы. Основным и наиболее важным вопросом при создании и эксплуатации информационных систем является обеспечение информационной безопасности. Она достигается путем применения последовательных, взаимосвязанных действий, направленных на обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации в системах.

В данной статье рассмотрена методика централизованного управления системами и информационными рисками на примере органов государственной власти Республики Тыва в целях оптимизации затрат на приобретение технических, программных и программно-аппаратных средства защиты информации, а также фонда оплаты труда обслуживающего технического персонала, явившаяся результатом применения мультиагентного подхода в имитационной модели [1].

Материалы и методы

Специфика объекта исследования. Методы и подходы

Исследование и апробация результатов проводились на примере информационно-телекоммуникационной инфраструктуры региональных органов государственной власти Республики Тыва. Ключевыми недостатками существующей системы являются: 1) отсутствие целостной информационной инфраструктуры управления информационной безопасностью органов власти; 2) несогласованность децентрализованно-

го принятия решений на разных уровнях управления информационной безопасностью. Децентрализованный подход к управлению информационной безопасностью малоэффективен в реальных условиях работы органов государственной власти. В каждом из регионов существуют свои особенности, повышающие информационные риски. Такими специфическими особенностями Республики Тыва, требующими совершенствования системы управления информационной безопасностью органов власти, являются географическое положение, неразвитость инфраструктуры, удаленность от федерального центра. Эти факторы в совокупности препятствуют достижению таких основных целей и целевых показателей, как создание устойчивой и безопасной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры высокоскоростной передачи, обработки и хранения больших объемов данных, доступной для всех организаций, и использование преимущественно отечественного программного обеспечения государственными органами, органами местного самоуправления и организациями [2]. Это обуславливает необходимость перехода на модель централизованного управления информационной безопасностью органов власти. Таким образом, технологическая реализация и взаимодействие органов власти должны осуществляться в рамках современного централизованного подхода. Централизованное управле-

ние информационной безопасностью заключается в реализации сетевой структуры организационного управления, взаимодействие между которыми осуществляется на базе их интеграции в единое региональное информационное пространство [3]. Эффективным средством реализации централизованной системы управления информационной безопасностью в данных условиях являются мультиагентные технологии. Это обусловлено двумя решающими факторами: высокой динамичностью среды функционирования субъектов управления и необходимостью координации принятия решений, и учета человеческого фактора в процессе управления. Комбинированное применение программных агентов и проблемно-ориентированных имитационных моделей обеспечивает адаптивное моделирование поведения субъектов управления с учетом их активности и кооперативности в условиях различных нештатных ситуаций [4].

Структура и состав информационно-телекоммуникационной сети

В пятиэтажном административном здании размещены четыре органа государственной власти Республики Тыва. Информационная инфраструктура каждого органа власти разграничена на логическом уровне, но используется единая, физическая структурированная кабельная сеть (СКС), спроектированная и введенная в эксплуатацию в 2007 году.

С помощью системного анализа эффективности применяемых мер защиты информации [5] в каждом органе государственной власти, а также финансовых затрат на обслуживание и сопровождение информационных ресурсов, систем и телекоммуникационной сети выявлен ряд вопросов, требующих дополнительного внимания при применении новой политики информационной безопасности. Так, например, каждый орган государственной власти осуществляет закупку технических, программных и программно-аппаратных средств защиты информации, а также средств вычислительной техники. Это приводит к неэффективному расходованию средств, нарушению политики информационной безопасности, снижению возможности управления информационными рисками, повышению уровня внутренних и внешних угроз [6]. Структурная схема существовавшей информационно-телекоммуникационной сети и информационных ресурсов органов государственной власти (рис. 1) демонстрирует эти проблемы.

Авторами проведены исследования, целью которых являлось изучение подходов построения эффективной системы защиты информации для всех органов государственной власти, при этом финансовые средства не должны превышать общий объем предусмотренных лимитов. Иными словами, без дополнительных средств на приобретение программно-аппаратных комплексов.

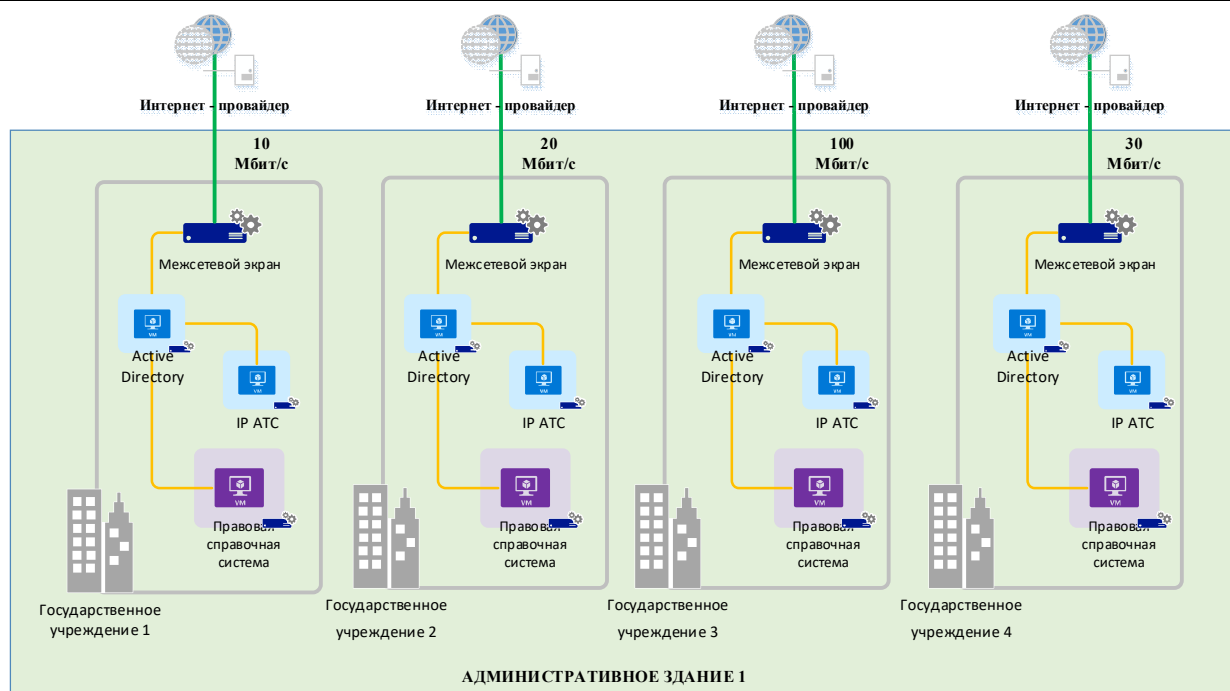


Рис. 1. Структурная схема информационно-телекоммуникационной сети и информационных ресурсов государственных учреждений, расположенных в пределах одного административного здания

Fig. 1. Structural diagram of the information and telecommunications network and information resources of government agencies located within the same administrative building

Для решения данного вопроса требовалось решить две задачи: техническую и организационную. В технической части приведен механизм создания единой информационно-вычислительной сети, объединяющей в единую систему различные ведомства государственной власти, находящиеся в пределах одного административного здания, позволяющий одновременно работать с распределенными или централизованными приложениями, базами данных и другими сервисами, а также централизованное управления рисками информационной безопасности [7]. В организационной части приводится взаимодействие персонала, формирование небольшого специализированного подразделения на базе одного государственного учреждения, обеспечиваю-

щие штатное функционирование сети и необходимый уровень информационной безопасности для всех ведомств государственной власти. Одним из главных преимуществ создания централизованного управления системами и обеспечения необходимого уровня защищенности таких сетей является процесс управления рисками, который позволяет направить все усилия на защиту от наиболее вероятных угроз [8].

В результате проведенных авторами исследований разработана методика централизованного управления системами и информационными рисками на примере органов государственной власти Республики Тыва. Применение разработанной методики позволит усовершенствовать систему управления информационной безопасностью, обеспе-

чить экономию финансовых средств на покупку программно-аппаратных средств защиты информации, повысить эффективность использования единых информационных сервисов. Реализация методики требует создания централизованного структурного подразделения, использующего в своей работе инструменты регулирования рисков и принимающего управленческие решения в области информационной безопасности, основанных на принципах системного анализа, метода структуризации и методов экспертного опроса [9].

Информационная инфраструктура (единая корпоративная сеть)

На первом этапе была проведена работа по логическому объединению информационно-телекоммуникационной сети органов государственной власти и метода мультиагентной реализации (Active Directory), построена на базе сервис-ориентированной архитектуры [10]. Интеграция сервисов агентов позволяет субъектам управления совместно использовать современные когнитивные информационные технологии и инструменты моделирования для выработки и реализации согласованных стратегий и управленческих решений в условиях неопределенности и риска [11].

В мультиагентной модели (Active Directory) каждой сущности реального мира ставится в соответствие программный агент, который представляет интересы данной сущности и может согласовывать свои решения с другими агентами.

Такой подход позволил создать единый центр управления и мониторинга коммуникационной сети и небольшой штат технических специалистов, осуществляющих работу по единой политике информационной безопасности [12] (рис. 2).

Единый выход в сеть интернет

Благодаря созданию единой корпоративной сети появилась возможность отказаться от других точек подключения к сети Интернет, что позволило сэкономить финансовые средства, использовать систему контроля доступа и учета интернет трафика [13], использовать системы защиты информации для всех органов власти, а также повысить скорость передачи информации.

Единые информационные системы

Отказ от дублирующих информационных систем общего пользования, например, справочные правовые системы, чаты, доска объявлений, локальное хранилище документов, система тестирования сотрудников и т.д., использование, в том числе, единой системы защиты информации для всех органов власти, например, межсетевой экран на границе сети Интернет, позволили существенно сократить затраты [14].

IP-телефония

За последние годы IP-телефония активно вытесняет традиционную телефонную связь по всем направлениям. Потенциал IP-телефонии намного шире, чем традиционная телефонная связь,

например, существует возможность интеграции с компьютером, доступ к разным голосовым терминалам, короткие номера для внутреннего использования,

автоответчик, конференцсвязь и т.д. IP-телефония на сегодняшний день успешно используется в государственном секторе.

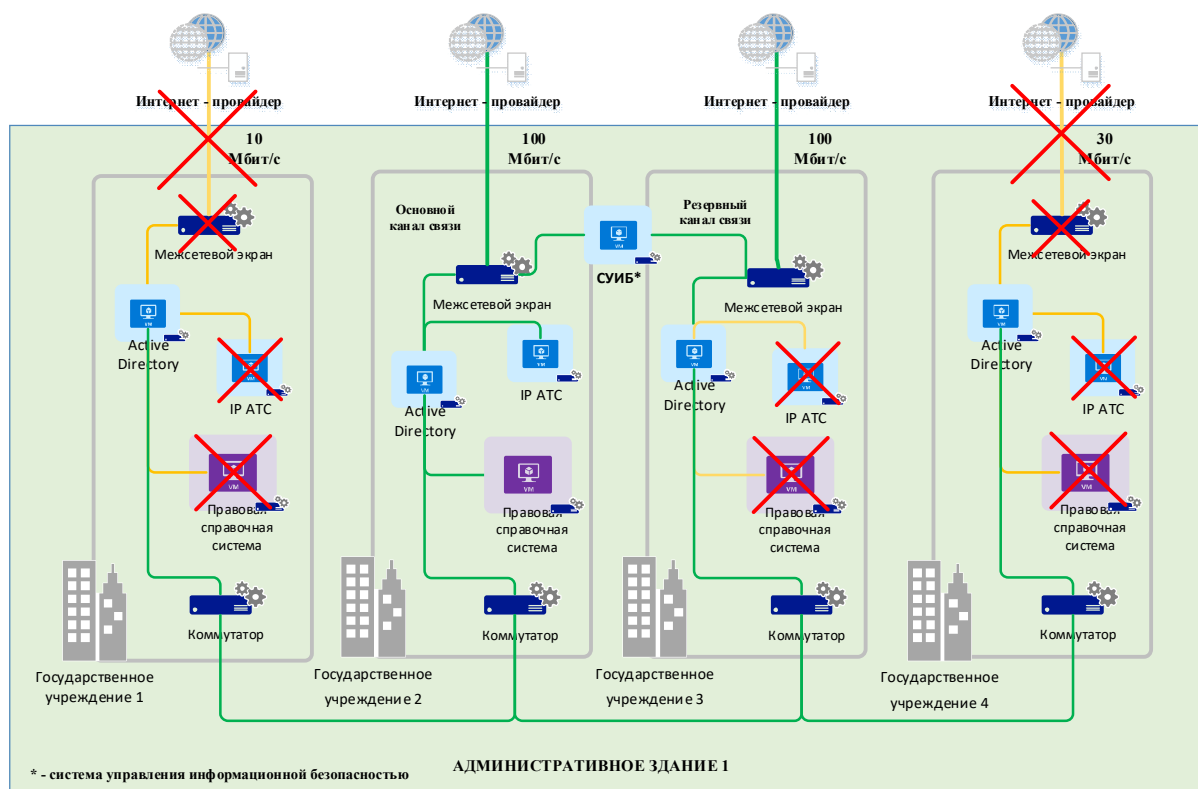


Рис. 2. Централизованный подход организации информационно-телекоммуникационной сети и информационных ресурсов государственных учреждений, расположенных в пределах одного административного здания

Fig. 2. Centralized approach to organizing an information and telecommunication network and information resources of state institutions located within the same administrative building

Существует два подхода к использованию IP-телефонии. Первый – полный отказ от традиционной телефонии. В этом случае для соединения абонентов используется локальная сеть. Второй подход подразумевает сохранение традиционной телефонной инфраструктуры, но с установленным новым оборудованием [22]. Поскольку реализация первого подхода требует определенной издержки по времени, реализация не представляется возможной. Таким обра-

зом, было принято решение использовать частично оба подхода, оставить традиционную телефонную инфраструктуру для непрерывности работы телефонной связи и модернизировать существующую локальную сеть для применения IP-телефонии. Выбранное решение, в свою очередь, может существенно расширить функционал телефонии. Необходимо отметить, что для корпоративных пользователей IP-телефония является не только эффективным средством опти-

мизации расходов на междугородные и международные телефонные переговоры, но и представляет возможность реализации на базе технологий IP-телефонии качественно новых сервисов [22] (рис. 3).

Переход на новую систему IP-телефонии позволил не только сэкономить финансовые средства на абонентские платы традиционных телефонных номеров, а также на IP-инфраструктуру, поскольку не потребовалось разверты-

вания локальной сети. Существующая информационно-телекоммуникационная сеть позволяет передавать и голосовой, и компьютерный трафик. При использовании IP-телефонии органы власти также избавились от необходимости оплаты аренды городских линий. IP-телефония обеспечивает бесплатную связь между органами власти и предоставляет все преимущества мобильности при перемещении сотрудников.

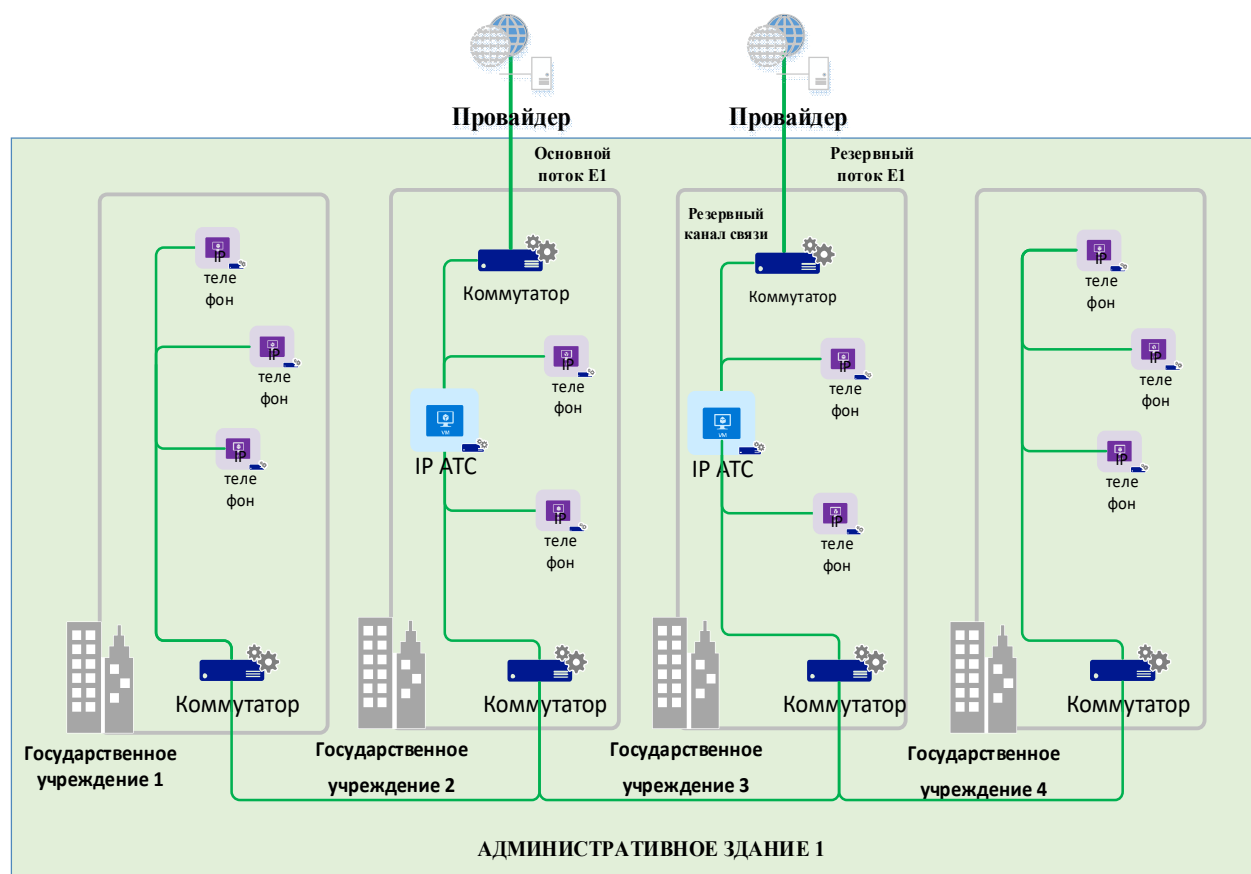


Рис. 3. Структурная схема организации IP-телефонии для государственных учреждений, расположенных в пределах одного административного здания

Fig. 3. Structural diagram of the organization of IP-telephony for public institutions located within the same administrative building

Информационная безопасность

Подсистема обеспечения информационной безопасности и администриро-

вания предназначена для защиты обрабатываемых и передаваемых данных в органах власти и ее программных компонентов от несанкционированного до-

ступа и воздействия вредоносных программ. Такая защита должна обеспечиваться как на уровне операционного ядра и приложений, так и на уровне сторонних платформ [15]. Администрирование заключается в поддержании корректной работы всех функциональных информационных систем и контроле действий пользователей. Коммуникационная подсистема обеспечивает взаимодействие между всеми подсистемами и внешними ведомственными и корпоративными информационными системами на основе современных Интернет-технологий и средств телекоммуникаций [16]. Унифицированная точка доступа к ресурсам и сервисам реализуется в виде портала на основе веб-технологий и построена на базе сервисориентированного подхода. Основными категориями пользователей являются: субъекты управления (лица, принимающие решения), субъекты обеспечения безопасности, системные аналитики, эксперты, разработчики и техниче-

ский персонал, обслуживающие программную и информационно-коммуникационную структуру [17].

Результаты и их обсуждение.

Экономическое моделирование

При анализе затрат рассматривалось соотношение планируемых и непланируемых затрат. Под оптимизацией затрат подразумевается процесс, результатом которого будет не бездумное сокращение статей затрат, а вдумчивое нахождение наилучшего решения, при котором будет возможно достижение заданного результата при минимальных ресурсных затратах [18].

Расходы органов власти Республики Тыва (информационные сервисы, телефонные линии связи и доступ к глобальной сети Интернет) за 2018 год приведены в табл. 1. В целях сохранения конфиденциальности приведены нормированные значения расходов органов власти.

Таблица 1. Расходы на 2018 г. с учетом НДС 18%

Table 1. Expenses for 2018, including VAT 18%

Наименование	Информационные сервисы / тыс. руб.	Телефонная связь / тыс. руб.	Доступ к глобальной сети Интернет / тыс. руб.
Орган власти 1	250,0	1 300,0	390,0
Орган власти 2	320,0	970,0	430,0
Орган власти 3	180,0	430,0	170,0
Орган власти 4	640,0	760,0	80,0
ИТОГО	1 390,0	3 460,0	1 070,0

Предложенная авторами методика централизованного управления системами и информационными рисками на примере органов государственной власти Республики Тыва позволила не только сэкономить финансовые средства на покупку программно-аппаратных комплексов (ПАК), но и со-

кратить количество работ, связанных с закупками. Закупочные работы проводятся одним из органов власти для всех, вместо четырех, что существенно облегчает нагрузку хозяйственного отдела. Табл. 2 демонстрирует полученный экономический эффект [19].

Таблица 2. Расходы на 2019 г. с учетом НДС 20%

Table 2. Expenses for 2019, including VAT 20%

Наименование	Информационные сервисы	Телефонная связь	Доступ к глобальной сети Интернет
Орган власти 1	590,0	2 030,0	560,0
Орган власти 2	0,0	0,0	0,0
Орган власти 3	0,0	0,0	0,0
Орган власти 4	130,0	0,0	0,0
ИТОГО	720,0	2 030,0	560,0
ЭКОНОМИЯ:	670,0	1 430,0	510,0

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 17 марта 2008 г. № 351 «О мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации при использовании информационно-телекоммуникационных сетей международного информационного обмена» выход в глобальную сеть Интернет должен осуществляться только с использованием специально предназначенных для этого средств защиты информации (межсетевые экраны, система обнаружения вторжений и т.д.) [20]. Таким образом, для каждого органа власти необходимо приобрести ПАК и ежегодное продление баз экспертных правил.

Табл. 3 демонстрирует необходимые расходы. В случае создания единой информационно-телекоммуникационной сети достаточно использовать имеющиеся ПАК у четвертого органа власти на границе сети Интернет [21, 22]. Таким образом, общая сумма экономии финансовых средств составила около 4,5 млн. руб.

Выводы

Разработанная информационно-технологическая архитектура органов государственной власти призвана обеспечить унификацию форм представления информации и методов ее обработки с целью интеграции средств.

Таблица 3. Экономия средств защиты информации за счет отказа дублирующих программно-аппаратных комплексов защиты информации**Table 3.** Savings in information security due to the failure of duplicate software and hardware information security systems

№	Наименование	Межсетевой экран на границе		ПАК для анализа событий информационной безопасности		ПАК для обнаружения вторжений в информационные системы		Расходы каждого органа власти / тыс. руб.	Экономия / тыс. руб.	ИТОГО на ИБ / тыс. руб.
		Затраты на приобретение ПАК / тыс. руб.	Техническая поддержка / тыс. руб.	Затраты на приобретение ПАК, / тыс. руб.	Ежегодное продление баз экспертных правил / тыс. руб.	Затраты на приобретение ПАК, / тыс. руб.	Ежегодное продление баз экспертных правил / тыс. руб.			
1	Орган власти 1	260,0	90,0	800,0	160,0	160,0	30,0	1 500,0	4 500,0	280,0
2	Орган власти 2	260,0	90,0	800,0	160,0	160,0	30,0	1 500,0		
3	Орган власти 3	260,0	90,0	800,0	160,0	160,0	30,0	1 500,0		
4	Орган власти 4	0,0	90,0	0,00 Р	160,0	0,00 Р	30,0	280,00		
								4 780,0		

Мультиагентная реализация управляющих элементов системы поддержки принятия решений и интеграция различных типов моделей управления безопасностью в единый комплекс позволили осуществлять совместную логико-аналитическую обработку данных и ситуационный анализ состояния изучаемого объекта с применением экспертных знаний и учетом пространственно-временных зависимостей. В результате получен экономический эффект за счет исключения приобретения дублирующих программно-аппаратных средств защиты информации, повышения эффективности использования единых информационных сервисов, а также создания централизованного структурно-

го подразделения, которое использует в работе инструменты регулирования рисков и принимает управленческие решения информационной безопасности, основанные на принципах системного анализа, метода структуризации и методов экспертного опроса. Вышеуказанные работы будут продолжены с акцентом на два направления:

1. Поэтапное добавление новых органов власти Республики Тыва к разработанной единой информационно-технологической архитектуре.
2. Анализ рабочей нагрузки сотрудников и коммуникационных потоков.

В дальнейших исследованиях планируется постановка экспериментов и анализ полученной информации по указанным направлениям.

Список литературы

1. Волков Д.В. Имитационное мультиагентное моделирование системы связи специального назначения // International Journal of Advanced Studies, 2017. Vol 7, №1-2. С. 31-37.
2. Oleynik A., Fridman A., Masloboev A. Informational and analytical support of the network of intelligent situational centers in Russian Arctic // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2109. P. 57-64.
3. Oliveira R., Ribeiro M., Vieira A. ELPC-CMAC: An enhanced cooperative mac protocol for broadband plc systems // Computer networks. 2019. Vol. 153. P. 11-22. ISSN: 1389-1286.
4. Mohamad Noor M., Hassan W. Current research on internet of things (IOT) security: A survey // Computer networks. 2019. Vol. 148. P. 283-294. ISSN: 1389-1286.
5. Vyalyi M., Khuziev I. Fast protocols for leader election and spanning tree construction in a distributed network // Problems of information transmission. 2017. Vol. 53, № 3. P. 183-201.
6. Nazarova Y., Bozhko Y. Development of it-infrastructure for the providing system of educational process in sparsely populated areas of the arctic zone of the Russian Federation// CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2109. P. 49-56.
7. El-Shekeil I, Pal A., Kant K. Precession: Progressive recovery and restoration planning of interdependent services in enterprise data centers // Digital communications and networks. 2019. Vol. 4. P. 39-47. ISSN: 2468-5925.
8. Arutyunov V. Clustering of information-security standards of the Russian Federation // Scientific and technical information processing. 2017. Vol. 44, №2. P. 125-133.
9. Yayla A., Lei Y. Information security policies and value conflict in multinational companies // Information and computer security. 2018. Vol. 26. P. 230-245. ISSN: 2056-4961.
10. Донгак Б.С. Мониторинг сетевой активности автоматизированных рабочих мест сотрудников организации // Безопасность информационных технологий. 2018. С. 71-79. ISSN 2074-7136.
11. Лохин С.В., Семашко А.В. Мониторинг сетевой активности персонала в целях обеспечения информационной безопасности предприятия // Вопросы защиты информации. 2017. №2 (117). С. 53-57.
12. Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А. Концептуальные вопросы информационной безопасности региона и подготовки кадров // Труды СПИИРАН. 2014. № 3 (34). С. 136-159.
13. Vasilyev V., Sulavko A., Zhumazhanova S., Borisov R. Identification of the psychophysiological state of the user based on hidden monitoring in computer systems // Scientific and technical information processing. 2018. Vol. 45, №6. P. 398-410.

14. Михайловская Н.Г. Центры управления информационной безопасностью // Безопасность информационных технологий. 2016. № 4. С. 38-51.
15. Jiang J., Wen S., Liu B., Yu S., Zhou W., Xiang Y. Malicious attack propagation and source identification // *Advances in information security*. 2019. Vol. 73. P. 1-192. ISSN: 1568-2633.
16. Ходашинский И.А., Мещеряков Р.В., Горбунов И.В. Методы нечеткого извлечения знаний в задачах обнаружения вторжений // Вопросы защиты информации. 2012. № 1. С. 45-50.
17. Абросимов М.Б., Камил И.А. Разработка системы предотвращения вторжений с использованием параллельного программирования и системы отказоустойчивости // Безопасность информационных технологий. 2018. № 1 (25). С. 65-73.
18. Filyak P.Y. Information security in the context of the digital economy// *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. Vol. 2109. P. 25-30.
19. Norkin V. B&B Method for discrete partial order optimization // *Computational management science*. 2019. P. 165-170. ISSN: 1619-697X.
20. Токарева М.В. Мультиагентный подход к планированию ресурсов // Сб. материалов XIX международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». Воронеж, 2019. С. 1757-1760.
21. Prelov V. On some optimization problems for the renin divergence // *Problems of information transmission*. 2018. Vol. 54. №3. P. 229-244.
22. Серебряник И.А., Дружинина А.В. IP-телефония для бизнеса: экономический аспект // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. №5-1. С.255-257.

References

1. Volkov D.V. Imitatsionnoe mul'tiagentnoe modelirovanie sistemy svyazi spetsial'nogo naznacheniya [Simulation of multi-agent modeling of a special-purpose communication system"]. *International Journal of Advanced Studies*, 2017, vol. 7, no. 1-2, pp. 31-37 (In Russ.).
2. Oleynik A., Fridman A., Masloboev A. Informational and analytical support of the network of intelligent situational centers in Russian Arctic. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2109, pp. 57-64.
3. Oliveira R., Ribeiro M., Vieira A. ELPC-CMAC: An enhanced cooperative mac protocol for broadband plc systems. *Computer networks*, 2019, vol. 153, pp. 11-22. ISSN: 1389-1286.
4. Mohamad Noor M., Hassan W. Current research on internet of things (IOT) security: A survey. *Computer networks*, 2019, vol. 148, pp. 283-294. ISSN: 1389-1286.
5. Vyalyi M., Khuziev I. Fast protocols for leader election and spanning tree construction in a distributed network. *Problems of information transmission*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 183-201.

6. Nazarova Y., Bozhko Y. Development of it-infrastructure for the providing system of educational process in sparsely populated areas of the arctic zone of the Russian Federation. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2109, pp. 49-56.
7. El-Shekeil I., Pal A., Kant K. Precession: Progressive recovery and restoration planning of interdependent services in enterprise data centers. *Digital communications and networks*, 2019, vol. 4, pp. 39-47. ISSN: 2468-5925.
8. Arutyunov V. Clustering of information-security standards of the Russian Federation. *Scientific and technical information processing*, 2017, vol. 44, no. 2, pp. 125-133.
9. Yayla A, Lei Y. Information security policies and value conflict in multinational companies. *Information and computer security*, 2018, vol. 26, pp. 230-245. ISSN: 2056-4961.
10. Dongak B.S. Monitoring setevoi aktivnosti avtomatizirovannykh rabochikh mest sotrudnikov organizatsii [Monitoring the network activity of automated workplaces of organization employees]. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = Information Technology Security*, 2018, pp. 71-79. ISSN 2074-7136 (In Russ.).
11. Lokhin S.V., Semashko A.V. Monitoring setevoi aktivnosti personala v tselyakh obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti predpriyatiya [Monitoring network activity of personnel in order to ensure information security of the enterprise]. *Voprosy zashchity informatsii = Issues of information security*, 2017, no. 2 (117), pp. 53-57 (In Russ.).
12. Meshcheryakov R.V., Shelupanov A.A. Kontseptual'nye voprosy informatsionnoi bezopasnosti regiona i podgotovki kadrov [Conceptual issues of information security of the region and training]. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAS*, 2014, no. 3 (34), pp. 136-159 (In Russ.).
13. Vasilyev V., Sulavko A., Zhumazhanova S., Borisov R. Identification of the psychophysiological state of the user based on hidden monitoring in computer systems. *Scientific and technical information processing*, 2018, vol. 45, no. 6, pp. 398-410.
14. Mikhailovskaya N.G. Tsentry upravleniya informatsionnoi bezopasnost'yu [Information Security Management Centers]. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = Security of information technology*, 2016, no. 4, pp. 38-51 (In Russ.).
15. Jiang J., Wen S., Liu B., Yu S., Zhou W., Xiang Y. Malicious attack propagation and source identification. *Advances in information security*, 2019, vol. 73, pp. 1-192. ISSN: 1568-2633.
16. Khodashinsky I.A., Meshcheryakov R.V., Gorbunov I.V. Metody nechetkogo izvlecheniya znanii v zadachakh obnaruzheniya vtorzhenii [Fuzzy methods of knowledge extraction in intrusion detection tasks]. *Voprosy zashchity informatsii = Issues of information security*, 2012, no. 1, pp. 45-50 (In Russ.).
17. Abrosimov M.B., Kamil I.A. Razrabotka sistemy predotvrashcheniya vtorzhenii s ispol'zovaniem parallel'nogo programmirovaniya i sistemy otkazoustoichivosti [Development of an intrusion prevention system using parallel programming and a fault tolerance system]. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = Security of information technology*, 2018, no. 1 (25), pp. 65-73 (In Russ.).

18. Filyak P.Y. Information security in the context of the digital economy [Information security in the context of the digital economy]. *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2109, pp. 25-30.
19. Norkin V. B&B Method for discrete partial order optimization. *Computational management science*, 2019, pp. 165-170. ISSN: 1619-697X.
20. Tokarev M.V. Mul'tiagentnyi podkhod k planirovaniyu resursov [Multi-agent approach to resource planning]. *Sbornik XIX mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii "Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii"* [Collection of the XIX international scientific-methodical conference "Informatics: problems, methodology, technologies". Voronezh, 2019, pp. 1757-1760 (In Russ.).
21. Prelov V. On some optimization problems for the renin divergence. *Problems of information transmission*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 229-244.
22. Serebrjanik I.A., Druzhinina A.V. IP-telefoniya dlya biznesa: ekonomicheskii aspekt [IP-telefonija dlja biznesa: jekonomicheskij aspekt]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual Problems of Humanities and Natural Sciences*, 2014, no.5, pt. 1, pp.255-257 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Донгак Буян Станиславович, аспирант, кафедра информатики, вычислительной техники и информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: d_n_buyan@list.ru

Buyan S. Dongak, Post-Graduate Student, Department of Informatics, Computer Engineering and Information Security, Altai State Technical University named after I.I. Polzunova (AISTU), Barnaul, Russian Federation, e-mail: d_n_buyan@list.ru

Шатохин Александр Семенович, кандидат технических наук, доцент, кафедра информатики, вычислительной техники и информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: asshatokhin@gmail.com

Aleksandr S. Shatohin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Informatics, Computer Engineering and Information Security, Altai State Technical University named after I.I. Polzunova (AISTU), Barnaul, Russian Federation, e-mail: asshatokhin@gmail.com

Мещеряков Роман Валерьевич, доктор технических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории 80, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: meshcheryakov.roman@gmail.com

Roman V. Meshcheryakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher at Laboratory 80, Russian Academy of Sciences, Institute of Management Problems named after V.A. Trapeznikova RAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: meshcheryakov.roman@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-115-132>

Настройка гиперпараметров искусственной нейронной сети для навигации мобильной платформы

Д. М. Дударенко¹ ✉, П. А. Смирнов¹

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

✉ e-mail: dmitry@dudarenko.net

Резюме

Цель исследования. Основной целью работы является повышение эффективности работы нейросетевой модели при навигации мобильной робототехнической платформы в статических и динамически сгенерированных средах.

Методы. Для решения поставленной задачи были предложены точная настройка и оптимизация гиперпараметров нейронной сети. Для стимулирования агентов исследовать окружающую среду была проведена корректировка системы вознаграждений, предполагающая повышение вознаграждения при уменьшении расстояния от агента до целевой точки и увеличение штрафа при движении в направлении, противоположном конечной точке, и при прохождении каждой последующей сцены. Такое распределение вознаграждений и штрафов побуждает агентов активно обучаться и способствует сокращению общего количества сцен. С целью уменьшения объема данных, обрабатываемых нейронной сетью, была введена нормализация входных векторов. Было уменьшено время обучения модели нейронной сети благодаря параллельному обучению агентов и, как следствие, увеличения опыта в результате исследования окружающей среды.

Результаты. Предложенный подход позволил сократить время обучения на 30% и повысить эффективность навигации мобильной платформы на 10% в динамически сгенерированной среде и на 22% в статической среде по сравнению с неоптимизированной моделью.

Заключение. Предложенное решение может быть использовано совместно с другими методами трассировки и навигации, когда обученная нейронная сеть работает одновременно с уже отработанными и проверенными алгоритмами навигации. Например, если мобильная платформа подключает обученную нейронную сеть только для корректировки положения в пространстве и предотвращения столкновений с другими объектами.

Ключевые слова: мобильный робот; навигация; искусственные нейронные сети; обучение с подкреплением.

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

Для цитирования: Дударенко Д. М., Смирнов П. А. Настройка гиперпараметров искусственной нейронной сети для навигации мобильной платформы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 115-132. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-115-132>.

Поступила в редакцию 03.10.2019

Подписана в печать 26.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Setting Artificial Neural Network Hyperparameters for Mobile Platform Navigation

Dmitry M. Dudarenko ¹ ✉, Petr A. Smirnov ¹

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 14-th Linia VI, 39, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: dmitry@dudarenko.net

Abstract

Purpose of research. The main purpose of this work is to increase the efficiency of a neural network model when navigating a mobile robotic platform in static and dynamically generated environments.

Methods. To solve this problem, precise setting and optimization of neural network hyperparameters were proposed. In order to encourage agents to explore the environment, the reward system was adjusted to increase the reward when the distance from the agent to the target point was reduced, and the penalty increased when moving in the opposite direction to the end point and passing each subsequent scene. This distribution of rewards and penalties encourages agents to learn actively and helps to reduce the total number of scenes. In order to reduce the amount of data processed by a neural network, normalization of input vectors was introduced. The learning time of the neural network model was reduced due to the parallel training of agents and, consequently, increased experience as a result of the environmental research.

Results. The proposed approach reduced the learning time by 30% and improved the navigation efficiency of the mobile platform by 10% in a dynamically generated environment and by 22% in a static environment compared to the non-optimized model.

Conclusion. The proposed solution can be used in conjunction with other methods of tracing and navigation, when the taught neural network works simultaneously with the already developed and proven navigation algorithms, for example, if the mobile platform connects a taught neural network only to adjust the position in space and to prevent collisions with other objects.

Keywords: mobile robot; navigation, artificial neural networks; reinforcement learning.

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

For citation: Dudarenko D. M., Smirnov P. A. Setting Artificial Neural Network Hyperparameters for Mobile Platform Navigation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 115-132 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-115-132>.

Received 03.10.2019

Accepted 26.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Мобильные робототехнические платформы и системы навигации ежедневно находят все большее применение в повседневной жизни. Их используют на складах, в торговых центрах, муниципальных, правительственных учреждениях и аэропортах [1, 2]. Платформа,

оснащенная навигационным программным обеспечением, может манипулировать объектами, собирать данные об окружающей среде, проверять безопасность маршрута для человека. Такая мобильная платформа и ее программное обеспечение должны отвечать определенным требованиям: иметь возмож-

ность обнаруживать динамические и статические препятствия, автономно анализировать объекты и обрабатывать большие данные, даже без подключения к сети. Использование бортовых видеокамер может быть не всегда оправдано из-за достаточно низкой скорости обработки изображений и видеосигнала, перспективных искажений. В таком случае решением является использование лидара. Лидар может быть использован как основной, так и как вспомогательный блок для измерительной системы робототехнической мобильной платформы. Благодаря отсутствию геометрических искажений, высокой производительности и точности измерения расстояния он является отличной заменой для видеокамеры.

Для решения задачи беспрепятственного движения мобильных платформ в стохастической среде ранее были разработаны системы навигации на основе двумерного лидара [3] и алгоритмы [4], обеспечивающие передвижение робототехнического средства к целевой точке в статическом и динамическом окружении [5]. Данная система основана на модели нейронной сети и позволяет учитывать присутствие статических и динамических препятствий на пути следования робота. Использование нейронной сети в динамически сгенерированном пространстве позволило повысить эффективность перемещения платформы, сделать алгоритм более адаптивным, по сравнению с классическими алгоритмами навигации.

Однако для разработанной системы были характерны застревания на месте. Поэтому целью работы является повышение эффективности системы навигации мобильной платформы. Данная задача была решена при помощи оптимизации и тонкой настройки гиперпараметров модели нейронной сети, корректировки системы вознаграждений и параллельного обучения моделей сразу нескольких мобильных платформ (агентов) на одной сцене.

Одной из важнейших задач при проектировании мобильных робототехнических средств является разработка системы навигации. Существует множество исследований, нацеленных на разработку методов и алгоритмов уточнения карты местности, движения по сложным траекториям, планирования движения с учетом присутствия препятствий на пути следования [6]. Перспективным направлением в данной научной области является использование искусственных нейронных сетей. Применение методов глубокого обучения обеспечивает плавность маневров роботов благодаря отслеживанию положения предметов в неизвестной окружающей среде [7]. В таком случае данные об окружающем пространстве могут быть получены посредством 2D-сканирования. Данные лидара поступают на вход сверточной нейронной сети, обученной при помощи метода Q-обучения, для последующей обработки. Такой подход позволяет мобильному роботу распознавать препятствия и избегать столкновения с ними при движе-

нии к целевой точке в загроможденном пространстве.

Принцип работы систем навигации на основе данных лидара базируется на определении следующего движения робота исходя только из значения расстояния от него до препятствия [8, 9]. Частые колебания измеряемого расстояния являются причиной резкого изменения скорости, что влечет за собой механические удары и неэффективное использование движущего момента двигателей. Данная проблема может быть решена при помощи использования буфера воспроизведения для хранения выходных данных сети [10]. То есть последние действия сохраняются в памяти и затем снова передаются на вход. Результаты тестирования, проведенного в симуляторе ROS-GAZEBO и в реальных условиях, показали более высокую точность такого подхода по сравнению с Leg Detector (LD), стандартным решением для роботов на основе операционной системы роботов (ROS).

Традиционный подход к навигации робота состоит из трех этапов. Первый этап подразумевает извлечение объектов из сцены, полученной при помощи камеры. Второй шаг заключается в определении текущей позиции робота с помощью классификатора извлеченных объектов. На последнем шаге определяется направление движения либо вручную, либо посредством обучения модули нейронной сети. В отличие от традиционного многошагового метода авторы работы [11] разработали визуально-

моторную навигационную систему на основе сверточной нейронной сети глубокого сквозного (End-to-end) обучения, которая позволяет определять линейные и угловые скорости робота за один шаг на основе входного изображения. Результаты экспериментов показали среднюю ошибку линейной скорости 2,2 см/с и среднюю ошибку угловой скорости 3,03 град/с. Предложенная система навигации может быть использована в реальных условиях и не требует применения дополнительных датчиков: лидара, радара, инфракрасной камеры, GPS.

Для повышения эффективности навигации мобильного робота в сложной среде модель нейронной сети может быть построена с учетом кинематических и динамических характеристик робототехнического устройства [12]. Например, в работе [13] предложена система навигации и построения карты окружающей среды на основе муравьиного алгоритма, которая учитывает переменную скорость движения мобильного робота. Такой подход позволяет робототехническому устройству снижать скорость в непосредственной близости к препятствиям и двигаться с высокой скоростью в открытых пространствах.

Навигация мобильной платформы осложняется отсутствием данных об окружающей среде особенно, в условиях пересеченной местности [14]. Для решения этой задачи авторы работы [15] разработали нейронную сеть глубокого обучения с подкреплением. Нейронная сеть получает в качестве вход-

ных данных необработанную информацию с датчиков, выходными данными модели являются локальные движения робота. Работоспособность предложенной модели была доказана при тестировании в уникальных динамически генерируемых трехмерных средах с различными размерами и уровнями проходимости.

Альтернативный подход при разработке систем управления заключается в использовании адаптивной сети на основе системы нечеткого вывода (adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) [17]. В этом случае для выбора параметров оценки используется генетический алгоритм, который генерирует данные посредством случайного подбора и комбинирования. Несмотря на то, что системы навигации на основе ANFIS могут быть встроены в малогабаритные платформы для движения в статическом пространстве [18], в загроможденных средах [19], данные системы не учитывают необходимость движения устройства в среде с динамическими препятствиями. Экспериментальные данные, представленные в [18, 19], демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода только при передвижении на небольшие расстояния среди статических препятствий. Тем не менее, в среде с динамическими препятствиями, например в социо-киберфизических системах, скорость достижения роботом целевой точки не является ключевым показателем, что связано с: 1) массогабаритными

показателями робота; 2) обеспечением безопасности людей и/или животных, которые могут находиться на пути робота и также будут восприниматься им как динамические препятствия.

Представленные в обзоре исследования демонстрируют эффективность применения искусственных нейронных сетей глубокого обучения при разработке систем навигации мобильных роботов. Такой подход не нуждается в большом объеме размеченных входных данных и обеспечивает плавность движений робота. Использование двумерного лидара в качестве основного средства очувствления робота позволяет отслеживать положение других объектов в сцене. При повышении эффективности системы управления движением платформы за счет учета механических параметров робота необходимы дополнительные программные и аппаратные средства. В свою очередь, повышение эффективности навигации при помощи тонкой настройки гиперпараметров достигается путем оптимизации модели нейронной сети и не требует увеличения объема входных данных и дополнительных датчиков.

Материалы и методы

Моделирование стохастической среды для действий робота проводилось на платформе Unity. В качестве статичной среды была выбрана 3D-модель одного из этажей здания научного учреждения СПИИРАН. 3D-модель включает в себя 33 комнаты, лестницы, проходы, кори-

доры, двери. Динамически генерируемая среда представляет собой помещения с произвольной геометрией, которые были смоделированы автоматически в режиме реального времени. Основными средствами навигации платформы являются: лидар, закрепленный на платформе, и предварительно обученная модель нейронной сети. Траектория движения платформы строится по координатам, углам поворота и данным, считываемым с лидара с учетом подвижных и неподвижных объектов, встречающихся на пути следования. В качестве входных данных нейронной сети использовались данные, получаемые с лидара, координаты мобильной платформы, а также координаты начальной и конечной точек маршрута. Выходными данными модели являются координаты следующего движения робота. Для обучения модели нейронной сети использовался плагин Unity ML и библиотека TensorFlow. Для обучения модели использовался метод обучения с подкреплением, так как он поддерживается средой Unity напрямую и не требует большого объема размеченных данных. В этом случае мобильный робот (агент) обучается, взаимодействуя с некоторой окружающей средой через сигналы подкрепления [16]. Подобный подход может оказаться особенно эффективен при навигации без карты [17]. Одним из главных этапов работы по оптимизации системы навигации является более тонкая настройка гиперпарамет-

ров модели используемой нейронной сети. Различают следующие гиперпараметры:

- Параметр регуляризации λ (lambda) — используется при расчете общей оценки преимущества (generalized advantage estimation, GAE) и отражает степень доверия текущему значению функции стоимости при определении нового значения. Малые значения λ соответствуют сильной зависимости от текущей величины вознаграждения, полученной при исследовании роботом окружающей среды. Настройка λ позволяет достичь компромисса в определении значимости текущего и нового значений функции стоимости и повысить эффективность процесса обучения.

- Количество скрытых слоев.
- Количество эпизодов обучения.

Эпизод – итерация моделирования, то есть прохождения роботом пути от начальной до целевой точки.

- ε (epsilon) — соответствует допустимому значению расхождения между старой и новой политикой в каждой итерации градиентного спуска. Чем меньше значение ε , тем большее время займет обучение.

- Временной горизонт (time horizon) – регулирует количество батчей (batches), которые нужно получить каждому агенту, прежде чем добавлять его в буфер опыта.

- Сила регуляризации энтропии β (beta) – отвечает за степень случайности обучения.

- Сила любопытства (curiosity strength) – отвечает за стимулирование исследования окружающего пространства.
- Количество эпох обучения.

1. Настройка гиперпараметров

Для повышения эффективности работы системы навигации агентов и уменьшения времени исследования окружающей среды была проведена настройка следующих гиперпараметров модели нейронной сети: числа скрытых слоев, временного горизонта, силы регуляризации энтропии β , силы любопытства и количества эпох обучения. С целью обеспечения баланса между скоростью обучения и качеством модели нейронной сети, количество скрытых слоев было уменьшено с 256 до 128. Изменение числа скрытых слоев позволяет контролировать количество нейронов в каждом полносвязном слое. Количество эпох (т.е. количество проходов через буфер опыта в каждой итерации градиентного спуска) было уменьшено с 8 до 3. Для возможности фиксации важных действий агента, таких как столкновения с другими объектами и застревание на месте, при частых вознаграждениях параметр «временной горизонт» был увеличен с 32 до 1000. Чтобы остановить непрерывный рост энтропии при обучении, параметры силы любопытства были отключены [20], а сила регуляризации энтропии β уменьшена с 0,005 до 0,001. Это, в свою очередь, гарантирует правильное исследование роботом пространства во время обучения.

На рис. 1 и 2 представлены графики изменения энтропии во время обучения нейронной сети для неоптимизированной и оптимизированной моделей соответственно.

Энтропия неоптимизированной модели увеличивается в течение обучения, что свидетельствует о том, что при попытке избежать столкновения с другими объектами платформа не достигает целевой точки. Уменьшение параметра способствует поощрению той политики агента, которая стимулирует его к изучению окружающего пространства. Благодаря отключению параметра силы любопытства и оптимизации β удалось достичь постепенного уменьшения энтропии.

С целью систематизации формы представления входных данных нейронной сети было уменьшено количество векторов координат точек пространства. Вместо координат начальной и целевой точек в виде (x, y, z) использовался трехмерный вектор. Такое решение позволило сократить объем обрабатываемых нейронной сетью данных.

2. Корректировка системы распределения вознаграждений

Для оптимизации системы распределения вознаграждений было предложено несколько решений. Для обеспечения более плавного движения платформы среди динамических и статических объектов был исключен модуль выдачи вознаграждений за сближение с динамическими и статическими объектами. Данный модуль штрафует аген-

та $(-0,01f)$ или назначал вознаграждение $(0,001f)$, если расстояние между лучами лидара и динамическими или статическими объектами было меньше 1 метра (в единицах измерения Unity).

Кроме того, было увеличено вознаграждение агента с $0,25f$ до $0,4f$ за

уменьшение расстояния до конечной точки. Для предотвращения движения агента в сторону, противоположные целевой точке был также увеличен $0,1f$ до $0,2f$. Штраф за каждую следующую пройденную платформой сцену был установлен на уровне $-0,005f$.

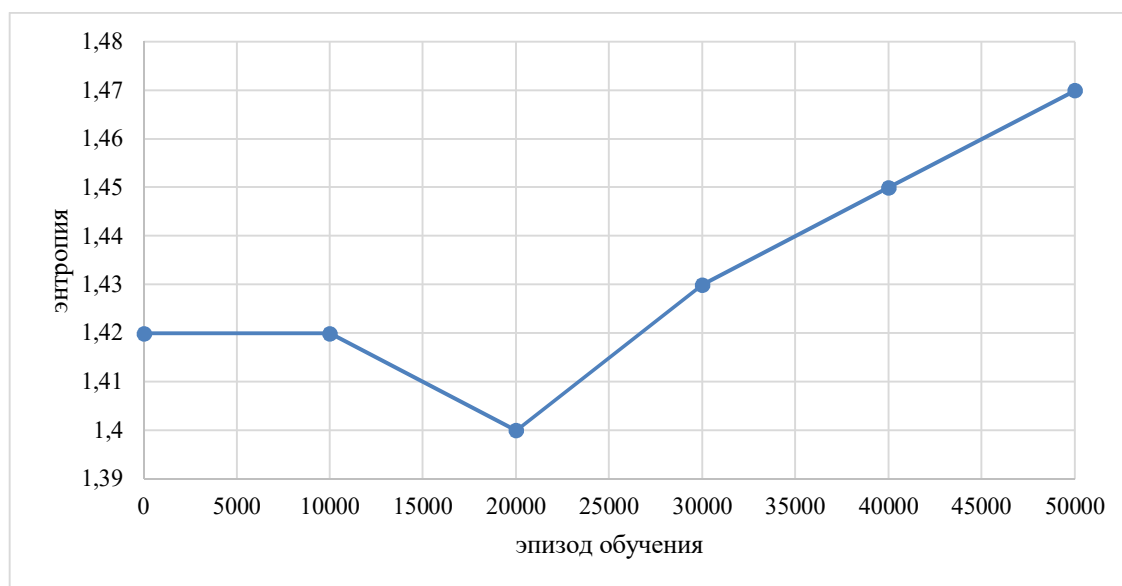


Рис. 1. Энтропия неоптимизированной модели нейронной сети

Fig. 1. Entropy of a non-optimized neural network model

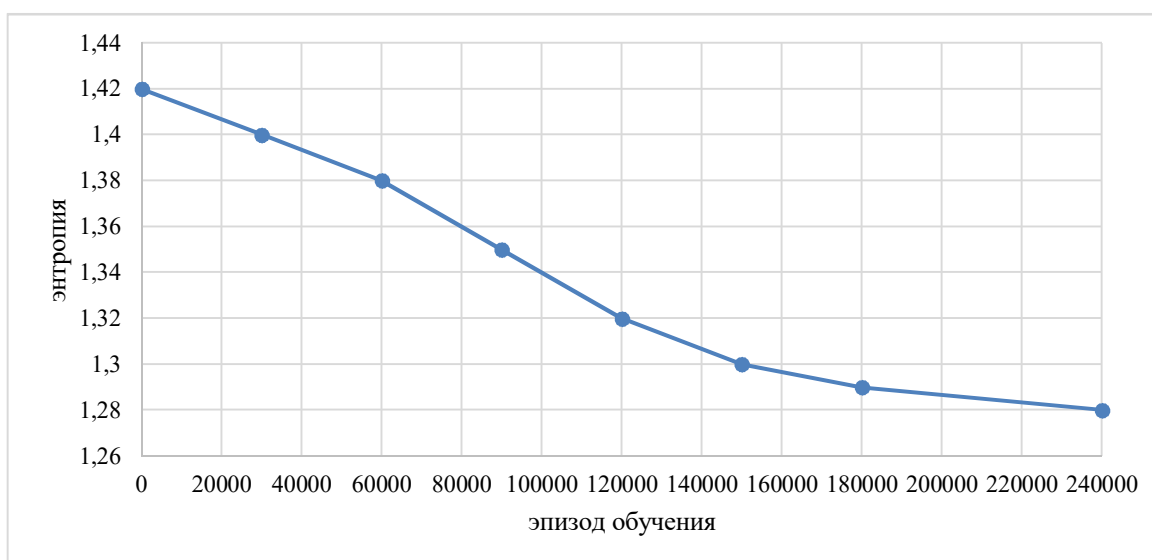


Рис. 2. Энтропия оптимизированной модели нейронной сети

Fig. 2. Entropy of an optimized neural network model

Подобное распределение вознаграждений побуждает платформу более активно обучаться на сцене и стремиться к сокращению общего количества сцен.

3. Параллельное обучение агентов

Время обучения нейронной сети напрямую зависит от объема полученного опыта в исследовании окружающей среды. Поэтому для сокращения времени обучения было увеличено количество агентов, одновременно находящихся на сцене. Среда Unity позволяет добавлять практически неограничен-

ное количество агентов на сцену. Тем не менее, большое количество агентов значительно увеличит время завершения сцены, так как для завершения обучения необходимо завершение всех действий каждого агента. Оптимальным балансом является использование не более 5 или 10 агентов одновременно. В настоящем исследовании было использовано 5 агентов для динамически сгенерированной среды и 5 агентов для смоделированной среды. На рис. 3 представлен процесс параллельного обучения нескольких агентов.

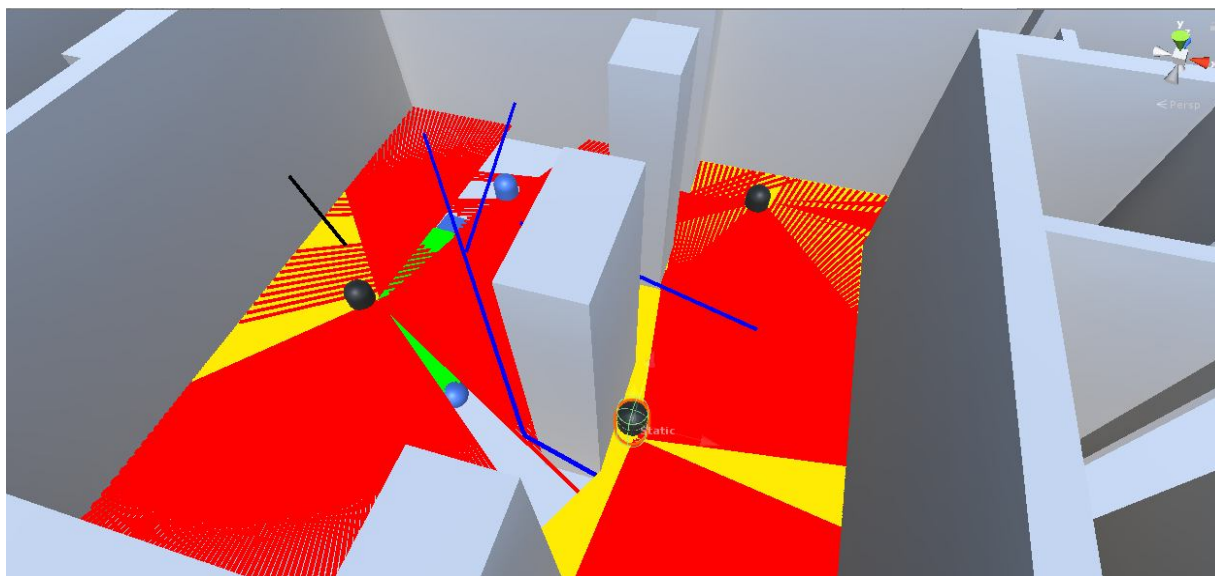


Рис. 3. Параллельное обучение агентов

Fig. 3. Parallel training of agents

На рисунке показаны лучи лидара: зеленого цвета — до динамических препятствий, желтого — до статических препятствий, лучи красного цвета означают отсутствие препятствий в пределах дальности измерений (5-10 м). Каждый агент движется по случайной траектории с переменной скоростью и внезапными остановками, что имитирует движение объектов в реальной среде. Агенты исследуют окружающую мест-

ность, аккумулируя весь свой опыт в общем интерфейсе Unity ML и не обмениваясь информацией между собой напрямую. Опыт робота представляет собой совокупность вознаграждений, штрафов, векторов координат точек траектории движения. Эти данные подвергаются нормализации и поступают на вход модели нейронной сети для дальнейшей обработки.

Результаты и их обсуждение

Обучение неоптимизированной модели нейронной сети осуществлялось на небольших объемах данных — 50 000 эпизодов. Предложенная тонкая настройка гиперпараметров нейронной сети позволила увеличить скорость обучения на 30%, что, в свою очередь, дало возможность расширить обучающий набор данных до 250 000 эпизодов. Такая настройка способствовала повышению стабильности во время обучения.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости средних прогнозируемых и суммарных вознаграждений за все предыдущие эпизоды от времени обучения для неоптимизированной и оптимизированной моделей соответственно.

Увеличение прогнозируемого вознаграждения в течение обучения свидетельствует о накоплении опыта агентов о предыдущих эпизодах. Прогнозируемое вознаграждение использует этот

опыт для предсказания последующих действий. Плавная возрастающая кривая суммарного вознаграждения отражает стабильность процесса обучения.

Для оценки эффективности предложенной оптимизации гиперпараметров было проведено по 5 экспериментов в каждой среде. Результаты сравнительного тестирования эффективности модели представлены в табл. Эффективность модели, как и в предыдущих работах, представляет собой долю успешного достижения агентами целевых точек, выраженную в процентах. Достижение считается успешным, если агент достиг конечной точки менее чем за 5 минут, не столкнувшись при этом с другими статическими и динамическими объектами, а также параллельно обучаемыми агентами. Следует отметить, что максимальная скорость платформы в экспериментах была ограничена значением 2 м/с.

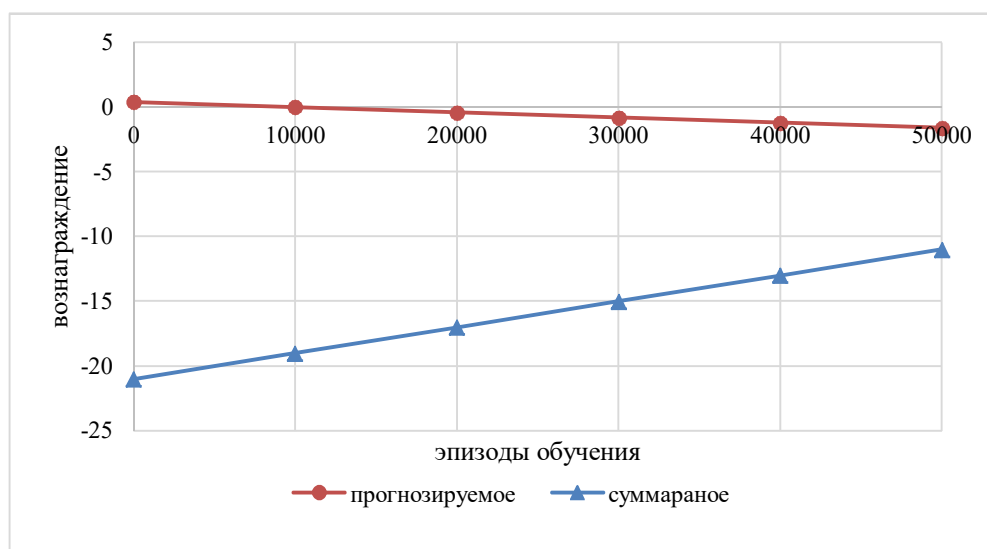


Рис. 4. Зависимость среднего прогнозируемого и суммарного вознаграждений от времени обучения неоптимизированной модели

Fig. 4. Dependency of mean predicted and aggregate rewards on the time of non-optimized model training

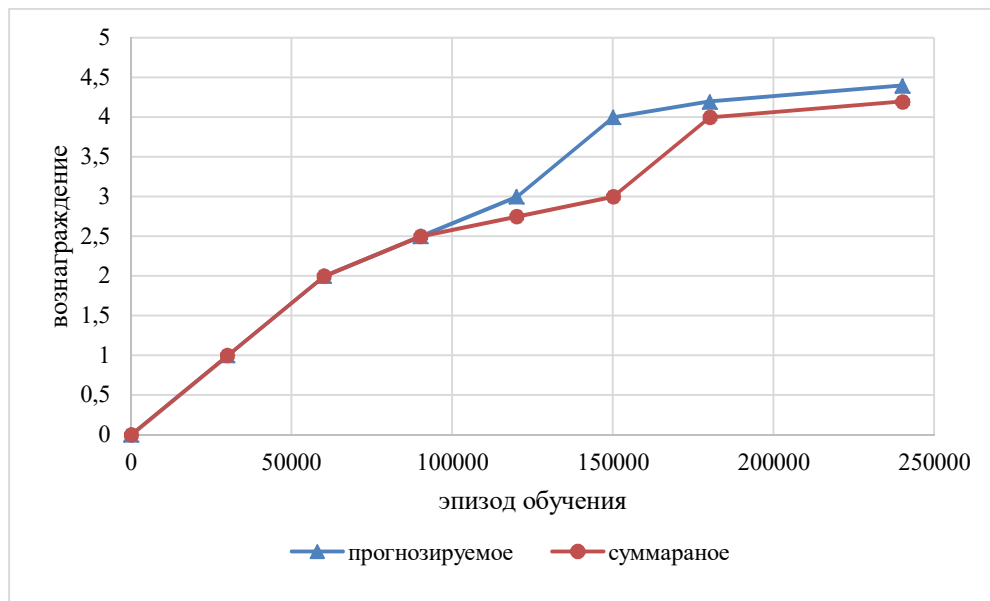


Рис 5. Зависимость среднего прогнозируемого и суммарного вознаграждений от времени обучения оптимизированной модели

Fig. 5. Dependency of mean predicted and aggregate rewards on the time of optimized model training

При проведении экспериментов было выбрано именно такое максимальное значение скорости, поскольку предполагается, что оно отвечает предполагаемым условиям эксплуатации моделируемых мобильных платформ с точки зрения их массогабаритных показателей и требований безопасности. Параметр точности для данной модели нейронной сети рассчитывается как отклонение пути агента от кратчайшего пути между двумя точками, рассчитанного по алгоритму A^* , который используется в среде Unity в качестве базового алгоритма расчета пути (в условных единицах расстояния в среде Unity). Параметр MSE для данной модели нейронной сети рассчитывается как среднеквадратичная ошибка координат (разница между фактическим и прогнозируемым местоположением агента).

Как видно из таблицы, для оптимизированной модели, обученной в динамически сгенерированном окружении, характерно более чем двукратное повышение эффективности (с 20% до 42%) по сравнению с неоптимизированной моделью, обученной в статическом окружении. Для модели, обученной в динамически сгенерированной среде и тестируемой в динамически сгенерированном окружении, прирост эффективности составляет 10% (с 40% до 50%). Для модели, обученной в статическом окружении и тестируемой в статичной среде, процент достижения целевой точки не изменился и составил 100%. Для модели, обученной в статическом окружении и тестируемой в динамическом окружении, улучшение, прирост эффективности составляет 10% (с 60% до 70%).

Таблица. Показатели эффективности моделей нейронной сети, обученных в различных средах**Table.** Performance parameters of neural network models, trained in different environments

Среда тестирования / Test environment	Неоптимизированная модель / Non-optimized model		Оптимизированная модель / Optimized model	
	Обучение в статичной среде / Training in static environment	Обучение в динамически сгенерированной среде / Training in dynamically generated environment	Обучение в статичной среде / Training in static environment	Обучение в динамически сгенерированной среде / Training in dynamically generated environment
Эффективность, % / Efficiency, %				
Статичная Static	100	20	100	42
Динамически сгенерированная Dynamically generated	60	40	70	50
Отклонение от заданного пути / Deflection from the specified path				
Статичная / Static	0.4	5	0.3	2.5
Динамически сгенерированная / Dynamically generated	3.0	2.5	2.7	2.25
MSE				
Статичная / Static	1.0	1.82	1.0	1.58
Динамически сгенерированная / Dynamically generated	1.38	1.74	1.33	1.51

Несмотря на незначительное увеличение эффективности для моделей, протестированных в динамически сгенерированной среде, стоит отметить сокращение общего времени достижения конечных точек. При использовании неоптимизированной модели этот параметр составил около 250-300 секунд

(3-4 минуты), тогда как для оптимизированной модели характерно значение 150-200 секунд (2-3 минуты).

Как видно из таблицы, для оптимизированной модели, обученной в динамически сгенерированном окружении, отклонение от заданного пути снизилось в два раза (с 5 до 2,5 единиц изме-

рения Unity) по сравнению с неоптимизированной моделью, обученной в статичном окружении. Для модели, обученной в динамически сгенерированной среде и тестируемой в динамически сгенерированном окружении, также наблюдается увеличение точности (отклонение снизилось с 2,5 до 2,25). Для модели, обученной в статичном окружении и тестируемой в динамическом окружении, среднее отклонение снизилось на 0,3 единицы. Для модели, обученной в статичном окружении и тестируемой в статичной среде, отклонение снизилось на 0,1 единицы. Значения средней ошибки, представленные в таблице, демонстрируют общее повышение точности модели, особенно для агентов, обученных в динамически сгенерированной среде.

Выводы

Предложенная тонкая настройка и оптимизация гиперпараметров позволила повысить эффективность навигации мобильной платформы на 10% в динамически сгенерированной среде и на 22% в статической среде. Эксперименты, проводимые в статичном помещении, показали эффективность навигации на 80% выше, чем при тестировании, проводимом в динамически генерируемом помещении. Параллельное обучение агентов на одной сцене позволило повысить скорость обучения. Тон-

кая настройка параметров нейронной сети позволила уменьшить энтропию и увеличить ожидаемое вознаграждение, что позитивно сказалось на принятии решений агентом во время передвижения. Отклонение от намеченной траектории при использовании оптимизированной модели нейронной сети уменьшилось по сравнению с неоптимизированной моделью. Базовая точность рассчитывается на основе встроенного в среду Unity алгоритма поиска пути A* и системы предотвращения столкновений, результаты работы которых сравниваются с результатами работы неоптимизированной и оптимизированной моделей. Отклонение агентов от заданного пути при использовании оптимизированной модели уменьшилось, при этом количество их столкновений с динамическими и статическими объектами не увеличилось, что говорит об эффективности применяемых в работе подходов. Результаты исследования могут быть применены для совершенствования алгоритмов навигации мобильных платформ [23, 24] в реальных условиях. Особый интерес предложенное решение может представлять при использовании с другими методами трассировки и навигации, когда обученная нейронная сеть действует совместно с уже отработанными и проверенными алгоритмами навигации.

Список литературы

1. Artificial intelligence and collaborative robot to improve airport operations / F. Donadio, J. Frejaville, S. Larnier, S. Vetault // *In Online Engineering & Internet of Things*. 2018. P. 973-986. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_91.
2. Kejia robot—an attractive shopping mall guider / Y. Chen, F. Wu, W. Shuai, N. Wang, R. Chen, X. Chen // *In International Conference on Social Robotics*. 2015. P. 145-154. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25554-5_15.
3. Robot Navigation System in Stochastic Environment based on Reinforcement Learning on Lidar Data / D. Dudarenko, A. Kovalev, I. Tolstoy, I. Vatamaniuk // *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics Zavalishin's Readings*. 2019; 525-536. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_44.
4. Dudarenko, Rubtsova, Kovalev, Sivchenko Reinforcement Learning Approach for Navigation of Ground Robotic Platform in Statically and Dynamically Generated Environments. *19th IFAC conference on technology, culture and international stability TECIS* (в печати).
5. Reignier P., Hansen V., Crowley J.L. Incremental supervised learning for mobile robot reactive control // *Robotics and autonomous systems*. 1997. № 19(3-4). P. 247-257. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(96)00054-1)
6. Deep Learning for Visual Navigation of Unmanned Ground Vehicles: A review / N. O'Mahony, S. Campbell, L. Krpalkova, D. Riordan, J. Walsh, A. Murphy, C. Ryan // *In 2018 29th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. 2018. №1-6. <https://doi.org/10.1109/ISSC.2018.8585381>
7. Kim K.S., Kim D.E., Lee J.M. Deep Learning Based on Smooth Driving for Autonomous Navigation. *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2018. P. 616-621.
8. Woods J.O., Christian J.A. Lidar-based relative navigation with respect to non-cooperative objects. *Acta Astronautica*. 2016. № 126. P. 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.05.007>
9. Multisensor Online Transfer Learning for 3D LiDAR-based Human Detection with a Mobile Robot / Z. Yan, L. Sun, T. Duckct, N. Bellotto // *In 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018. P. 7635-7640. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593899>
10. Tracking People in a Mobile Robot From 2D LIDAR Scans Using Full Convolutional Neural Networks for Security in Cluttered Environments / Á.M. Guerrero-Higueras, C. Álvarez-Aparicio, M.C.C. Olivera, F.J. Rodríguez-Lera, C. Fernández-Llamas, F.M. Rico, V. Matellán // *Frontiers in neurorobotics*. 2018. №12. P. 1-13. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00085>

11. Kim Y.H., Jang J.I., Yun S. End-to-end deep learning for autonomous navigation of mobile robot // *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. 2018. №1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326229>.
12. Khnissi K., Seddik C., Seddik H. Smart Navigation of Mobile Robot Using Neural Network Controller // *2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT)*. 2018. P. 205-210. <https://doi.org/10.1109/SaCoNeT.2018.8585616>.
13. Variable Speed Robot Navigation by an ACO Approach / T. Lei, C. Luo, G.E. Jan, K. Fung // *In International Conference on Swarm Intelligence*. 2019. P. 232-242. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26369-0_22.
14. Traversability Assessment and Trajectory Planning of Unmanned Ground Vehicles with Suspension Systems on Rough Terrain / Y.K. Zhang, Yang, M. Fu, M. Wang // *Sensors*. 2019. №19(20). P. 4372. <https://doi.org/10.3390/s19204372>.
15. Robot navigation of environments with unknown rough terrain using deep reinforcement learning / K. Zhang, F. Niroui, M. Ficocelli, G. Nejat // *In 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. 2018. P. 1-7. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2018.8468643>.
16. Learning navigation behaviors end-to-end with autorl / HT. L. Chiang, A. Faust, M. Fiser, A. Francis. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. № 4(2). P. 2007-2014. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2899918>.
17. Jang J.S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1993. № 23(3). P. 665-685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>.
18. Mobile robot navigation in unknown static environments using ANFIS controller / A. Pandey, S. Kumar, K.K. Pandey, D.R. Parhi // *Perspectives in Science*. 2016. №8. P. 421-423. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.094>
19. Pandey A., Parhi D.R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered environment // *International Journal of Advanced Robotics and Automation*. 2016. № 1(1). P. 1-11. <https://doi.org/10.15226/2473-3032/1/1/00102>
20. Smart W.D., Kaelbling L.P. Effective reinforcement learning for mobile robots // *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292). 2002. № 4. P. 3404-3410. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1014237>
21. Tai L., Paolo G., Liu M. Virtual-to-real deep reinforcement learning: Continuous control of mobile robots for mapless navigation // *In 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017. P. 31-36. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8202134>
22. Curiosity-driven exploration by self-supervised prediction / D. Pathak, P. Agrawal, A.A. Efros, T. Darrell // *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2017. P. 16-17. URL: http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017_workshops/w5/papers/Pathak_Curiosity-Driven_Exploration_by_CVPR_2017_paper.pdf.

23. Proactive Localization System Concept for Users of Cyber-Physical Space / A. Saveliev, D. Malov, A. Edemskii, N. Pavliuk // *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*. 2018; 11097: 233-238. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3_24

24. Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Мобильная робототехническая платформа как компонент киберфизического интеллектуального пространства // *Экстремальная робототехника*. 2017. №1. Р. 37-42.

References

1. Donadio F., Frejaville J., Larnier S., Vetault S. Artificial intelligence and collaborative robot to improve airport operations. *In Online Engineering & Internet of Things*, 2018, pp. 973-986. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_91.

2. Chen Y., Wu F., Shuai W., Wang N., Chen R., Chen X. Kejia robot—an attractive shopping mall guider. *In International Conference on Social Robotics*, 2015, pp. 145-154. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25554-5_15.

3. Dudarenko D., Kovalev A., Tolstoy I., Vatamaniuk I. Robot Navigation System in Stochastic Environment based on Reinforcement Learning on Lidar Data. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics Zavalishin's Readings*, 2019, pp. 525-536. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_44.

4. Dudarenko, Rubtsova, Kovalev, Sivchenko Reinforcement Learning Approach for Navigation of Ground Robotic Platform in Statically and Dynamically Generated Environments. *19th IFAC conference on technology, culture and international stability TECIS* (in press).

5. Reignier P., Hansen V., Crowley J.L. Incremental supervised learning for mobile robot reactive control. *Robotics and autonomous systems*, 1997, no. 19(3-4), pp. 247-257. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(96)00054-1)

6. O'Mahony N., Campbell S., Krpalkova L., Riordan D., Walsh J., Murphy A., Ryan C. Deep Learning for Visual Navigation of Unmanned Ground Vehicles: A review. *In 2018 29th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, 2018, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISSC.2018.8585381>

7. Kim K.S., Kim D.E., Lee J.M. Deep Learning Based on Smooth Driving for Autonomous Navigation. *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2018, pp. 616-621.

8. Woods J.O., Christian J.A. Lidar-based relative navigation with respect to non-cooperative objects. *Acta Astronautica*, 2016; no. 126, pp. 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.05.007>.

9. Yan Z., Sun L., Duckctr T., Bellotto N. Multisensor Online Transfer Learning for 3D LiDAR-based Human Detection with a Mobile Robot. *In 2018 IEEE/RSJ International Con-*

ference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018, pp. 7635-7640. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593899>

10. Guerrero-Higueras Á.M., Álvarez-Aparicio C., Olivera M.C.C., Rodríguez-Lera F.J., Fernández-Llamas C., Rico F.M., Matellán V. Tracking People in a Mobile Robot From 2D LIDAR Scans Using Full Convolutional Neural Networks for Security in Cluttered Environments. *Frontiers in neurorobotics*, 2018, no. 12, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00085>.

11. Kim Y.H., Jang J.I., Yun S. End-to-end deep learning for autonomous navigation of mobile robot. *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. 2018; 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326229>.

12. Khnissi K., Seddik C., Seddik H. Smart Navigation of Mobile Robot Using Neural Network Controller. *2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT)*. 2018, pp. 205-210. <https://doi.org/10.1109/SaCoNeT.2018.8585616>.

13. Lei T., Luo C., Jan G.E., Fung K. Variable Speed Robot Navigation by an ACO Approach. *In International Conference on Swarm Intelligence*, 2019, pp. 232-242. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26369-0_22.

14. Zhang K., Yang Y., Fu M., Wang M. Traversability Assessment and Trajectory Planning of Unmanned Ground Vehicles with Suspension Systems on Rough Terrain. *Sensors*, 2019, no. 19(20), 4372 p. <https://doi.org/10.3390/s19204372>.

15. Zhang K., Niroui F., Ficocelli M., Nejat G. Robot navigation of environments with unknown rough terrain using deep reinforcement learning. *In 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2018, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2018.8468643>.

16. Chiang HT. L., Faust A., Fiser M., Francis A. Learning navigation behaviors end-to-end with autorl. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, no. 4(2), pp. 2007-2014. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2899918>.

17. Jang J.S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1993, no. 23(3), pp. 665-685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>.

18. Pandey A., Kumar S., Pandey K.K., Parhi D.R. Mobile robot navigation in unknown static environments using ANFIS controller. *Perspectives in Science*, 2016, no. 8, pp. 421-423. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.094>.

19. Pandey A., Parhi D.R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered environment. *International Journal of Advanced Robotics and Automation*, 2016, no. 1(1), pp. 1-11. <https://doi.org/10.15226/2473-3032/1/1/00102>.

20. Smart W.D., Kaelbling L.P. Effective reinforcement learning for mobile robots. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292). 2002; 4: 3404-3410. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1014237>.
21. Tai L., Paolo G., Liu M. Virtual-to-real deep reinforcement learning: Continuous control of mobile robots for mapless navigation. *In 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 31-36. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8202134>.
22. Pathak D., Agrawal P., Efros A.A., Darrell T. Curiosity-driven exploration by self-supervised prediction. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2017, pp. 16-17. Available at: http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017_workshops/w5/papers/Pathak_Curiosity-Driven_Exploration_by_CVPR_2017_paper.pdf.
23. Saveliev A., Malov D., Edemskii A., Pavliuk N. Proactive Localization System Concept for Users of Cyber-Physical Space. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018, no. 11097, pp. 233-238. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3_24.
24. Vatamanyuk I.V., Saveliev A.I. Mobil'naya robototekhnicheskaya platforma kak komponent kiberfizicheskogo intellektual'nogo prostranstva [Mobile robotic platform as a component of cyber-physical intellectual space]. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*, 2017, no. 1, pp. 37-42 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Дударенко Дмитрий Михайлович, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокберфизических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: dmitry@dudarenko.net

Dmitry M. Dudarenko, Junior Researcher, Laboratory of Big Data and Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: dmitry@dudarenko.net

Смирнов Петр Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: petruha.smirnov.1994@gmail.com

Petr A. Smirnov, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: petruha.smirnov.1994@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>

Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете

С.Ф. Яцун¹, О.Г. Локтионова¹, Х.Х.М. Аль Манджи¹,
А.С. Яцун¹ ✉, А.Е. Карлов¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Появление экзоскелетов – роботов открывает новые возможности в реабилитации пациентов, имеющих повреждение нижних конечностей. Несмотря на рост публикаций по этой тематике, многие вопросы, связанные с разработкой инструментальных средств проектирования на основе моделирования движения человека в экзоскелете с использованием теоретических основ устойчивого движения в вертикальном положении, изучены недостаточно. Поэтому целью данной статьи является разработка методов повышения эффективности системы управления экзоскелетом нижних конечностей при двуногой ходьбе.

Методы. Ключевой особенностью статьи является применение методов моделирования задающих законов движения экзоскелета. Применяются методы математического моделирования движения звеньев с учетом последующего возможного их применения на моделировании движения звеньев экзоскелета, составляются уравнения траекторий с применением векторно-матричного метода. Исследуются траектории движения стопы, голени и бедра экзоскелета при устойчивой ходьбе.

Результаты. Для моделирования работы робототехнического комплекса (прототипа экзоскелета нижних конечностей с десятью активными степенями свободы) применяется кинематическое задание траектории движения звеньев. Для нахождения вектора обобщенных координат решается обратная задача кинематики с применением векторно-матричного метода с применением матрицы Якоби. Результаты численного моделирования показывают высокую сходимость и адекватность предложенного метода. Методика позволяет задавать траектории движения оператора в экзоскелете на реальных аппаратах.

Заключение. В статье исследование ходьбы выполнено с позиций моделирования квазистатической походки с помощью кинематических подходов. Разработанный метод определения задающих углов поворота звеньев экзоскелета для различных положений стопы с учетом положения проекций центра масс используется при разработке алгоритмов управления движением человека в экзоскелете.

Ключевые слова: паттерны походки; экзоскелет нижних конечностей; кинематическая модель; реабилитация; задающие траектории; устойчивая ходьба.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00440.

© Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Аль Манджи Х.Х.М., Яцун А.С., Карлов А.Е., 2019

Для цитирования: Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, Х.Х.М. Аль Манджи, А.С. Яцун, А.Е. Карлов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 133-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>.

Поступила в редакцию 14.10.2019

Подписана в печать 22.07.2019

Опубликована 23.12.2019

Simulation of Controlled Motion of a Person When Walking in an Exoskeleton

Sergei F. Yatsun¹, Oksana G. Loktionova¹,
Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood¹,
Andrey S. Yatsun¹ ✉, Andrey E. Karlov¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Robot exoskeletons open up new possibilities in the rehabilitation of patients with lower limb injuries. Despite the growing number of publications on this topic, many issues related to the development of design tools based on the simulation of human movement in an exoskeleton using the theoretical basis of stable movement in the upright position have not been studied well enough. Therefore, the purpose of this paper is to develop methods for improving the efficiency of the lower extremity exoskeleton control system for biped gait.

Methods. The key feature of the paper is the application of modeling techniques determining the laws of the exoskeleton motion. Methods of mathematical modeling of the motion of sections are used, taking into account their subsequent possible use in modeling the motion of exoskeleton sections; trajectory equations are composed using the vector-matrix method. The trajectories of the exoskeleton's foot, lower leg, and hip movement during steady walking are studied.

Results. To simulate the operation of a robotic complex - a prototype of an exoskeleton of the lower extremities with ten active degrees of freedom, kinematic definition the trajectory of the sections is used. To find the vector of generalized coordinates, the inverse kinematics problem is solved applying the vector-matrix method using the Jacobian matrix. The results of numerical simulation show high convergence and efficacy of the proposed method. The proposed method allows defining the trajectory of the operator in the exoskeleton in real devices.

Conclusion. In the paper, the study of walking is performed from the standpoint of modeling a quasi-static gait using kinematic approaches. The developed method for determining the defining angles of rotation of the exoskeleton sections for different foot positions taking into account the position of the mass center projections, is used in the development of algorithms for controlling human motion in the exoskeleton.

Keywords: gait patterns; low-extremity exoskeleton; kinematic model; rehabilitation; defining trajectories; stable walking.

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: Yatsun S. F., Loktionova O. G., Postol'nyy A.A., Al' Mandzhi K. H. M., Yatsun A.S., Karlov A. E. / Simulation of Controlled Motion of a Person When Walking in an Exoskeleton // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 133-147 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 25.10.2019

Введение

Появление экзоскелетов - роботов открывает новые возможности в реабилитации пациентов, имеющих повреждение нижних конечностей, что позволяет адаптировать их к условиям реальной жизни. Несмотря на рост публикаций по этой тематике, многие вопросы, связанные с разработкой инструментальных средств проектирования на основе моделирования движения человека в экзоскелете с использованием теоретических основ устойчивого движения в вертикальном положении, изучены недостаточно. Во многих странах, в том числе таких, как Япония, США, Южная Корея, Германия, Россия, ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении нижних конечностей. Изучаются вопросы поведения человека в экзоскелете при выполнении различных упражнений. Достаточно подробно изучается вопрос вертикализации человека, причем решение базируется на обратной задаче кинематики и динамических уравнениях, условием устойчивого процесса является обеспечение положения центра масс экзоскелета в опорной плоскости [1-6]. Наиболее сложным движением, с точки зрения моделирования, является ходьба человека в экзоскелете. Поэтому интерес к этой проблеме значителен [7-11]. Существует большое число публикаций по двуногой ходьбе [11, 12-15].

Однако в большинстве случаев ходьба рассматривается только в одной сагиттальной плоскости [16, 12, 17-19], что ограничивает область применения полученных результатов для экзоскелетных приложений. Дело в том, что ходьба в экзоскелете близка к квазистатической походке. Поэтому моделирование ходьбы необходимо рассматривать с позиций пространственной кинематики, так как движение происходит как в сагиттальной, так и во фронтальной плоскостях. Такой подход к моделированию движения можно встретить только в некоторых работах, например [20, 21].

Материалы и методы

1. Описание экзоскелета

Человека в экзоскелете можно рассматривать как некоторую человеко-машинную систему (ЧМС). На рис.1 представлен общий вид экзоскелета нижних конечностей, приводимый в движение только приводами экзоскелета. Он состоит из следующих основных элементов: 1 — корсет, 2 — бедра, 3 — голени, 4 — стопы. Для описания ходьбы ЧМС важно выбрать характерные точки, принадлежащие ЧМС, положение которых изменяется во времени и определяет устойчивую походку. При квазистатической ходьбе, когда ускорения незначительны, к этим точкам относятся центр масс C (ЦМЭ) и, точки, принадлежащие левой или правой стопам,

если считать, что стопы при ходьбе двигаются поступательно.

2. Кинематика движения центра масс человека в экзоскелете

Для кинематического анализа движения рассматриваемой ЧМС необходимо выбрать закон движения проекций ЦМЭ вдоль опорной плоскости: $\bar{r}_C = \bar{r}_C(t)$. Законы изменения координат центра масс от времени на каждом участке траектории представим в виде:

$$\begin{aligned} x_C(t) &= \sum_{i=0}^s c_i t^i; \quad y_C(t) = \sum_{i=0}^u d_i t^i; \\ z_C(t) &= \sum_{i=0}^p e_i t^i, \end{aligned} \quad (1)$$

где c_i , d_i , e_i – постоянные, определяемые из начальных условий; s , u , p – порядок полиномов.

Рассмотрим траекторию движения проекции ЦМЭ C по горизонтальной плоскости xOy . Траектория движения ЦМЭ приведена на рис. 2. Здесь показано положение стоп 1, 2 и центра масс 3 в различные моменты времени. Параметры, задающие движение центра масс: y_1, y_2 – координаты стопы; $2L$ – длина шага; y_m – максимальное отклонение центра масс от продольной оси симметрии Ox ; T – время выполнения одного шага.

Движение ЦМЭ начинается во фронтальной плоскости из двухопорной фазы из точки O и направлено на перенос ЦМЭ во фронтальной плоскости на левую стопу на расстояние Oy_m . После этого, правая стопа отрывается от опор-

ной поверхности и начинает перемещение в сагиттальной плоскости вдоль Ox , одновременно с этим ЦМЭ движется вдоль левой стопы параллельно Ox .

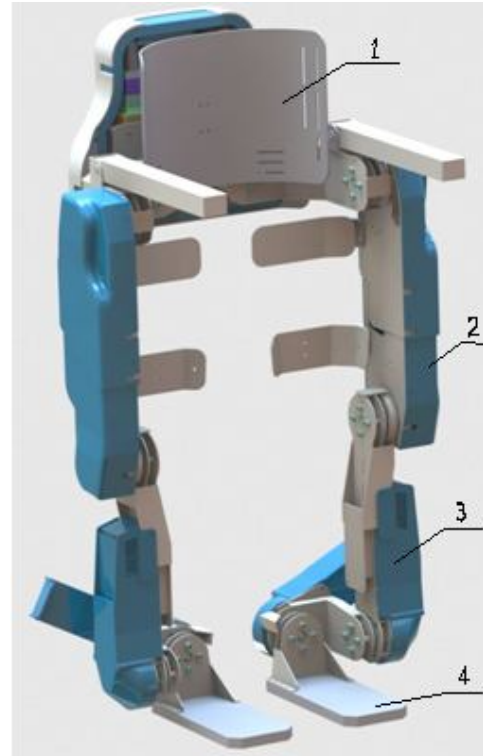


Рис. 1. Общий вид прототипа экзоскелета:
1 – корсет; 2 – бедра; 3 – голени; 4 – стопы

Fig. 1. General view of the prototype exoskeleton:
1 – brace, 2 – hips, 3 – legs, 4 – feet

Условием устойчивого положения ЧМС является нахождение ЦМЭ внутри опорной, в данной случае, левой стопы, поэтому ЦМЭ перемещается на расстояние $L/2$, которое меньше L_2 . После приземления правой стопы на опорную поверхность ЧМС переходит в двухопорную фазу, в которой происходит перенос центра масс во фронтальной плоскости с левой стопы на правую. Далее движения повторяются. Таким образом, в установившемся режиме длина полшага должна быть меньше длины стопы: $L < L_1 + L_2$.

Преимуществом рассматриваемой походки является то, что движение звеньев ЧМС происходит в сагиттальной и фронтальной плоскостях независимо

друг от друга, что значительно упрощает алгоритм управления движением. Недостатком же является невысокая скорость движения.

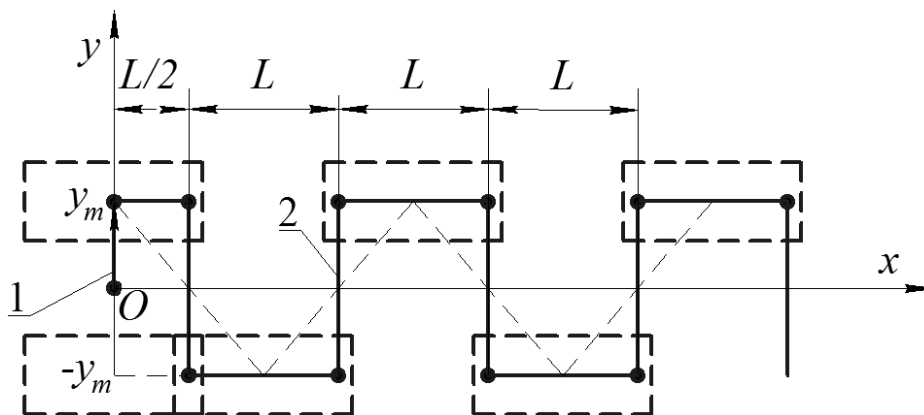


Рис.2. Схема движения центра масс и стоп человеко-машинной системы

Fig. 2. The scheme of the center of mass motion and feet of a man-machine system

Шаг разобьем на четыре участка и положим, что сшивка участков происходит при условии равенства соответствующих координат и скоростей, что отражается в граничных условиях. Время движения по участку составит $T/4$. Время прохождения k -го участка определяется из условия

$$(k-1)T/4 < t < kT/4, \quad (2)$$

где $k=1,2,3,4,\dots$ – номер участка траектории.

Таким образом, уравнения движения центра масс на первом участке имеют вид: $y_C = v_y t$, $x_C = 0$, ($v_x = 0$). На втором участке $y_C = y_m$, $x_C = v_x t$, $x_C < L/2$. На третьем участке $y_C = y_m - v_y t$, $x_C = L/2$. На четвертом участке $y_C = -y_m$, $x_C = v_x t$, $L/2 < x_C < 3L/2$. Здесь v_y , v_x – проекции скорости ЦМЭ на координатные оси.

3. Кинематика движения стоп экзоскелета

Рассмотрим движение стоп, которые должны двигаться синхронно с центром масс, обеспечивая его положение в опорном полигоне. Схема движения стоп экзоскелета в пространстве $Oxyz$ приведена на рис. 3. Будем считать, что походка ЧМС определена уравнениями, задающими движение точек A_2, A_6 , принадлежащих стопам в виде векторных соотношений, для правой стопы: $\vec{r}_{A_2} = \vec{r}_{A_2}(t)$; для левой стопы: $\vec{r}_{A_6} = \vec{r}_{A_6}(t)$. Точки A_i (центры голеностопного сустава) ($i=2$ или 6), принадлежащие стопам, совершают движение по некоторым пространственным траекториям.

Для описания движения стоп удобно применить локальные координатные системы, соответственно, для правой стопы $B_2 h_2 l_2$ и для левой – $B_6 h_6 l_6$.

Точки B_i ($i=2$ или 6) принадлежат опорной поверхности и определяют начало локальных координатных систем $B_i h_i l_i$.

Радиус-векторы, определяющие положение точек A_i в локальных координатных системах, имеют вид:

$$\bar{r}_{B_i A_i} = [l_i, 0, h_i]^T. \quad (3)$$

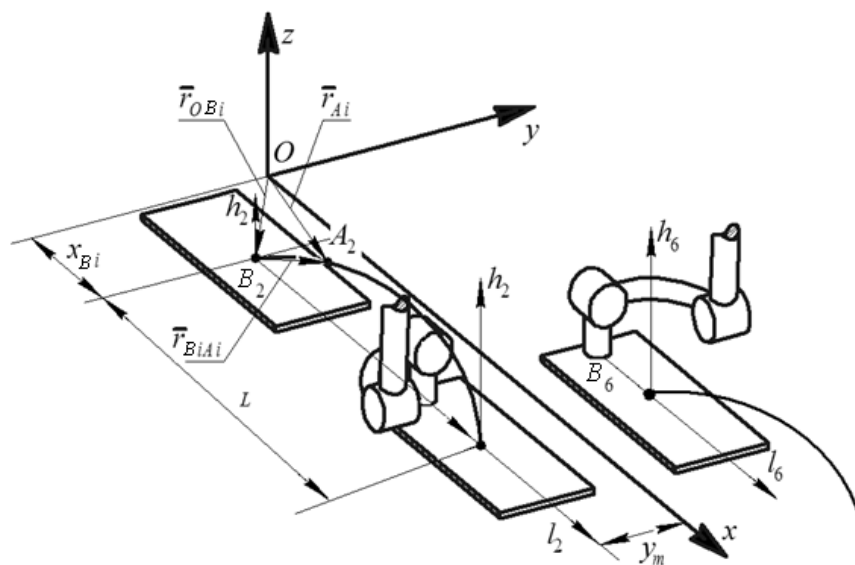


Рис. 3. Схема движения стоп экзоскелета в пространстве Oxyz

Fig. 3. Exoskeleton foot motion pattern in space Oxyz

Радиус – векторы, определяющие положение точек B_i

$$\bar{r}_{OB_i} = [x_{B_i}, y_{B_i}, 0]^T, \quad (5)$$

где $x_{B_i} = x_{B_i}^0 + L_{ik}$, $y_{B_i} = y_m$, L_{ik} – длина k -го шага i -той стопы.

При симметричной ходьбе по прямой длины шага левой и правой стоп равны, то есть $L_2 = L_6$. Соответственно высоты подъема стоп также равны $H_2 = H_6$. На значения этих параметров накладываются ограничения $H_2 < H_2^m$; $L_2 < L_2^m$, определяемые предельными значениями углов в соответствующих шарнирах экзоскелета. Радиус-векторы,

Функции $l_i = l_i(t)$, $h_i = h_i(t)$ можно представить в следующем виде:

$$l_i = \sum_{i=0}^n a_i t^i; \quad h_i = \sum_{i=0}^m b_i t^i, \quad (4)$$

где a_i, b_i – постоянные, определяемые из начальных условий; n, m – порядок полиномов.

описывающие положение этих точек в пространстве Oxyz, имеют вид

$$\bar{r}_{A_i} = \bar{r}_{OB_i} + \bar{r}_{B_i A_i}. \quad (6)$$

Если правая стопа лежит на опорной поверхности, то точка A_6 , принадлежащая левой стопе, будет двигаться по некоторой траектории, а ее положение на этой траектории определяется радиус-вектором $\bar{r}_{A_6}$. Аналогично, при опоре на левую стопу $h_6 = 0$, а положение точки A_2 определяется радиус-вектором $\bar{r}_{A_2}$. Определим радиус-векторы $\bar{r}_{B_i A_i}$:

$$\bar{r}_{B_2 A_2} = (x_{B_2 A_2}, y_{B_2 A_2}, z_{B_2 A_2})^T,$$

$$\bar{r}_{B_6 A_6} = (x_{B_6 A_6}, y_{B_6 A_6}, z_{B_6 A_6})^T.$$

Рассмотрим уравнения (7), задающие движение правой стопы для случая $n=1, m=2$, что соответствует траектории стопы:

$$h_2 = a_2 + b_2 \cdot l_2 + C_2 \cdot l_2^2. \quad (7)$$

Для нахождения постоянных в уравнении (5.30) запишем граничные условия в виде:

$$1) h_2 = 0, l_2 = L_2; \quad (8)$$

$$2) h_2 = 0, \text{ то } l_2 = 0; \quad (9)$$

$$3) h_2 = H_2, l_2 = \frac{L_2}{2}. \quad (10)$$

Подставляя (8), (9), (10) в (7) получим:

$$\begin{cases} H_2 = a_2 + b_2 \cdot \frac{L_2}{2} + C_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \\ 0 = a_2 \\ 0 = a_2 + b_2 \cdot L_2 + C_2 \cdot L_2^2 \end{cases} \quad (11)$$

Из первого уравнения:

$$b_2 = \left(H_2 - C_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \right) \cdot \frac{2}{L_2},$$

из второго:

$$b_2 = -\frac{C_2 \cdot L_2^2}{L_2} = -C_2 \cdot L_2.$$

Приравнявая получим:

$$-C_2 \cdot L_2 = \frac{2 \cdot H_2}{L_2} - C_2 \cdot \frac{L_2}{2}.$$

Отсюда:

$$C_2 = -\frac{4H_2}{L_2^2},$$

$$b_2 = \frac{4H_2}{L_2}.$$

Параметрические уравнения принимают вид:

$$l_2(t) = v_2 \cdot t, \quad (12)$$

$$h_2(t) = 4 \frac{H_2}{L_2} \cdot v_2 \cdot t - 4 \frac{H_2}{L_2^2} \cdot v_2^2 \cdot t^2. \quad (13)$$

Аналогично определяются параметрические уравнения движения левой стопы. На рис. 4 показана траектория движения точки A_2 для $n=1, m=2$.

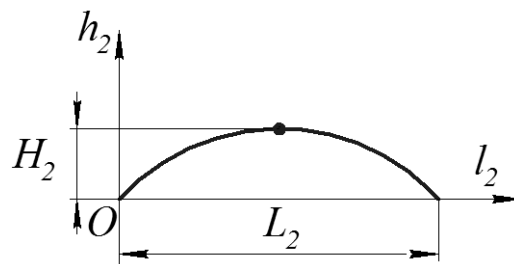


Рис. 4. Траектории движения стоп при движении с отрывом от опорной поверхности

Fig. 4. Trajectories of feet motion when moving with getting off the supporting surface

Таким образом, задавая движение центра масс по определенной траектории, например, по формулам (11) и пересчитывая синхронное положение стоп по формулам (12), (13), можно синтезировать движение экзоскелета при различных походках человека в экзоскелете. Проведенный анализ позволяет сформулировать требования к внешним параметрам, определяющим походку. Для ее реализации необходимо установить кинематическую связь между этими параметрами и обобщенными координатами, определяющими положение звеньев механизма силового каркаса экзоскелета. Для этого можно использовать расчетные схемы, приведенные на рис. 3. По этим схемам получены формулы, устанавливающие связь между вектором обобщенных координат $q(t)$ и векторами, задающими положение

центра масс $\bar{r}_c = \bar{r}_c(\bar{q})$ и синхронного положения стоп $r_{Ai} = \bar{r}_{Ai}(\bar{q})$.

4. Моделирование задающих законов движения экзоскелета

Примем, что нижние конечности человека двигаются вместе с элементами экзоскелета, будучи жестко связанными с ними, поэтому задающие законы, определяющие положение звеньев ЧМС, удобно представить вектором обобщенных координат $\bar{q}(t)$, определяющим положение звеньев экзоскелета в любой момент времени, причем $\bar{q} \in R^\xi$, где ξ – число обобщенных координат, подлежащих определению. На вектор $\bar{q}(t)$ наложены ограничения, определяемые физиологическими особенностями человека. $\bar{q}^- \leq \bar{q} \leq \bar{q}^+$, где $\bar{q}^-, \bar{q}^+$ – предельные значения обобщенных координат.

Синтез задающих законов осуществляется путем решения обратной задачи кинематики, которую сформулируем следующим образом. Пусть заданы внешние параметры ходьбы: L – длина шага; T – время выполнения одного шага; $2y_m$ – расстояние между стопами во фронтальной плоскости, геометрические размеры стоп, а также желаемые законы движения центра масс $\bar{r}_c(t)$ и закон движения стоп $\bar{r}_{Ai}(t)$; $i=2$ – для правой стопы, $i=6$ – для левой. Вектор обобщенных координат $\bar{q}(t)$, подлежащих определению, имеет вид:

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_6, \theta_2, \theta_6)^T. \quad (14)$$

Пусть дана вектор-функция $\bar{F}$, которая определяет значения, соответствующие проекциям центра масс и стопы в зависимости от обобщенных координат $\bar{q}$. Вектор-функцию $\bar{F}(\bar{q})$, удобно рассматривать в локальной координатной системе, тогда она примет вид:

$$\bar{F}(\bar{q}) = [\bar{r}_{BiAi}(\bar{q}), \bar{r}_c(\bar{q})]^T, \quad (15)$$

где $i=2$ или 6 .

Введем также вектор-функцию:

$$\bar{\Phi}(t) = [\bar{r}_{BiAi}(t), \bar{r}_c(t)]^T \text{ или}$$

$$\bar{\Phi}(t) = [l_i(t), y_i(t), h_i(t),$$

$$x_c(t), y_c(t), z_c(t)]^T, \quad (16)$$

где $i=2$ или 6 ,

которая задает положение точек C и A_i во времени на соответствующих заданных траекториях.

Так как

$$\bar{F}(\bar{q}) = \bar{\Phi}(t), \quad (17)$$

то уравнение (17) позволяет определить значения вектора $\bar{q}$ по заданной функции $\bar{\Phi}(t)$. Для получения решения этого уравнения продифференцируем полученное выражение по времени

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \dot{\bar{q}} = \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (18)$$

Отсюда,

$$\dot{\bar{q}} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1} \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (19)$$

Обозначим обратную матрицу Якоби:

$$J^{-1} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1}. \quad (20)$$

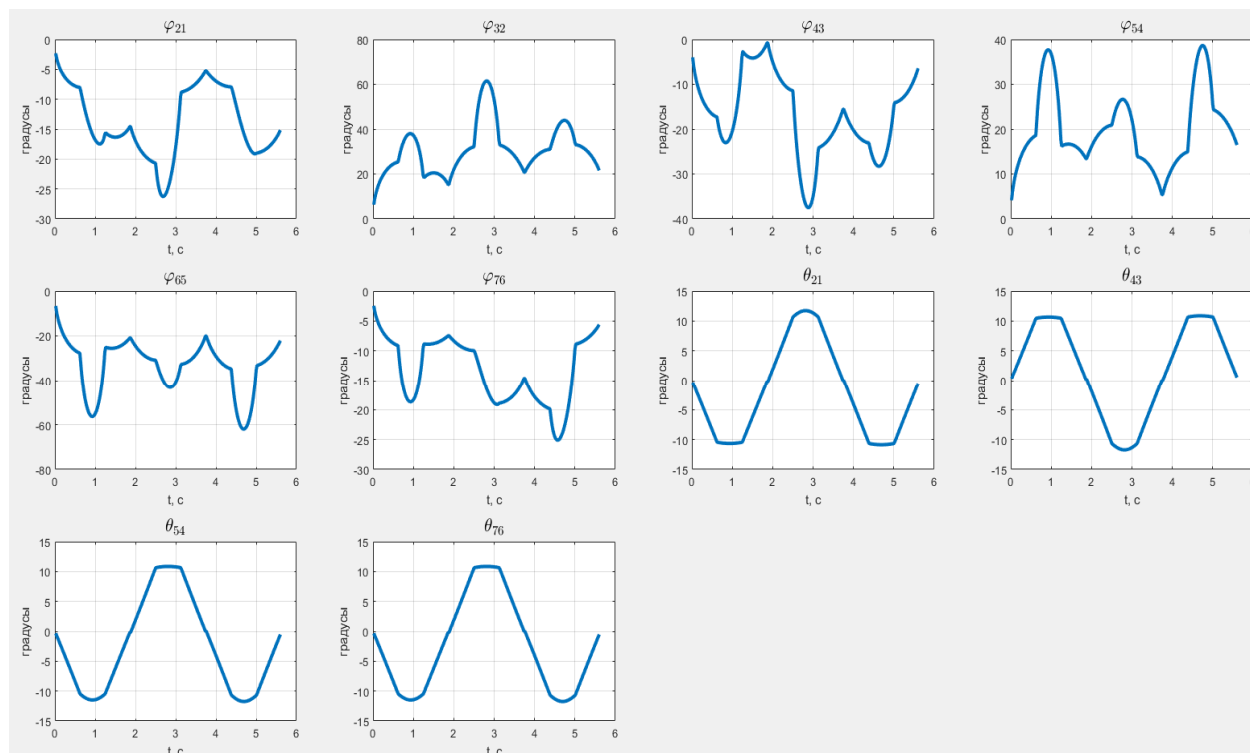


Рис. 5. Графики зависимости относительных углов от времени

Fig. 5. Graphs of dependency of relative angles on time

Тогда, в дискретной форме выражение (3.16) перепишем в виде:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + \alpha_k J^{-1} \Delta \bar{\Phi}(t), \quad (21)$$

где $\Delta \bar{\Phi}(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}(t)$ на временном шаге Δt .

Результаты и их обсуждение

Полученное соотношение позволяет находить вектор обобщенных координат $\bar{q}$ на $k+1$ -м временном шаге по известному значению $\bar{q}$ на k -м шаге. Здесь $\alpha_k \leq 1$ – скалярная величина постоянного или переменного шага.

Применяя полученный алгоритм, определим желаемые абсолютные углы, входящие в вектор

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_6, \theta_2, \theta_6)^T.$$

Отсюда, из абсолютных углов, получим относительные углы, которые определяют работу электроприводов, установленных в шарнирах экзоскелета, воспользовавшись формулами:

$$\varphi_{i,i-1} = \varphi_i - \varphi_{i-1},$$

(22)

$$\theta_{i,i-1} = \theta_i - \theta_{i-1}. \quad (23)$$

Определим вектор относительных углов:

$$\bar{q}_r = (\varphi_{i,i-1}, \theta_{i,i-1})^T. \quad (24)$$

Результаты моделирования представлены в виде графиков, отражающих зависимость относительных углов от времени (рис. 5).

Выводы

В статье исследование ходьбы выполнено с позиций моделирования квазистатической походки с помощью кинематических подходов. Разработанный метод определения задающих углов по-

ворота звеньев экзоскелета для различных положений стопы с учетом положения проекций центра масс используется при разработке алгоритмов управления движением человека в экзоскелете.

Список источников

1. Ergasheva B.I. Lower Limb Exoskeletons: Brief Review // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1153-1158.
2. December. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, R. Turlapov // In Mechatronics and its Applications (ISMA), 10th International Symposium. 2015. P. 1-6. IEEE.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization // In Control and Automation (MED), 24th Mediterranean Conference. 2016. P. 322-326. IEEE.
4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase // In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20th International Conference, 2016. P. 113-118. IEEE.
6. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery // In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20th International Conference, 2016, P. 107-112. IEEE.
7. Гаврилов С. В., До Т. З. Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // *Автоматизация в электроэнергетике и электро-технике*. 2016. №1. С.72-76.
8. Домрачев Т. Б., Яшметов К. С., Лоскутов Ю. В. Кинематика локомоций человека при вставании из седа и посадке на опору // *Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России*. 2017. №. 1. С. 40-42.
9. Лавровский Э. К. Об энергетике походок человека-оператора, осуществляемых при помощи аппарата “пассивный” экзоскелетон // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2015. №. 1. С. 9-24.
10. Лушников Б. В., Скрыльников Н. Е. Имитационная модель процесса вертикализации экзоскелета нижних конечностей в среде Simmechanics/MATLAB с учетом

сухого трения в кинематических парах // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сборник научных статей по материалам XI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. / отв. ред. С.Ф. Яцун. Курск, 2014. С. 261-271.

11. Павловский В. Е. [и др.]. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации— концепция, конструкция, модели и управление // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. 2014. № 10. С. 111-19.

12. NEUROExos: A powered elbow exoskeleton for physical rehabilitation / N. Vitiello, T. Lenzi, S. Roccella, S. M.M. De Rossi, E. Cattin, F. Giovacchini, F. Vecchi, M. Carrozza. // Robotics, IEEE Transactions on 29, 2013. No. 1. P.220-235.

13. Нейрореабилитационный комплекс: структура, управление движением экзоскелетных модулей / В.Е. Павловский, А.К. Платонов, А.П. Алисейчик, И.А. Орлов, В.В., Павловский А.А. Птахин // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сборник научных статей по материалам XI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. / отв. ред. С.Ф. Яцун. Курск, 2014. С. 312-322.

14. Разработка и имплементация сплайн-алгоритма планирования пути в среде ROS/GAZEBO / Р.О. Лавренов, Е.А. Магид, Ф. Мацуно, М.М. Свинин, Д. Сутагорн // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 1. С. 57-84.

15. Хусаинов Р.Р., Климчик А.С., Магид Е.А. Оптимизация параметров движения двуногого шагающего робота // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2018. № 13 (223). С. 119-125.

16. Zoss A.B., Kazerooni H., Chu A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. 2006. №11(2). P.128-138.

17. Алисейчик А. П. [и др.] Механика и управление экзоскелетами нижних конечностей для нейрореабилитации спинальных больных // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник. Казань, 2015. С. 132-134.

18. Борисов А. В., Розенблат Г. М., Чигарев А. В. Применение матричного метода и рекуррентного алгоритма к модели плоского многосвязного механизма со звеньями переменной длины, движущегося по горизонтальной плоскости // Теоретическая и прикладная механика: научно-техн. сборник. Минск, 2018, С.370-380.

19. Борисов А. В. Механика пространственной модели экзоскелета и антропоморфного робота //Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 3-4. С. 46-55.

20. Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция, эксперименты / А. П. Алисейчик, И. А. Орлов, Е. Ю. Колесниченко, В. Е. Павловский, В. В. Павловский., А. К. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №17(10). С. 670-677.

21. Основные клиничко-анатомические критерии для разработки экзоскелета верхней конечности / А.А. Воробьев, А.В. Петрухин, О.А. Засыпкина, П.С. Кривоножкина // Журнал анатомии и гистопатологии. 2014. Т. 3. № 1. С. 20-26.

References

1. Ergasheva B.I. Lower Limb Exoskeletons: Brief Review. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1153-1158.

2. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R., Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In *Mechatronics and its Applications (ISMA)*, 10th International Symposium. 2015, pp. 1-6. IEEE.

3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization. In *Control and Automation (MED)*, 2016 24th Mediterranean Conference 2016, pp. 322-326. IEEE.

4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation.

5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2016 20th International Conference 2016, pp. 113-118. IEEE.

6. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2016, 20th International Conference, pp. 107-112. IEEE.

7. Gavrilov S. V., Zang D. T. Komp'yuternoye modelirovaniye dinamiki dvizheniya pyatistepennogo shagayushchego robota [Computer simulation of the dynamics of motion of a five-step walking robot]. *AEE Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike = AEE Automation in the electric power industry and electrical engineering*, 2016, no. 1, pp. 72-76. (In Russ.).

8. Domrachev T.B., Yashmetkov K.S., Loskutov Yu.V. Kinematika lokomotsiy cheloveka pri vstavaniy iz seda i posadke na oporu [Kinematics of human locomotion when standing up from a gray-haired vehicle and landing on a support]. *Inzhenernye kadry-*

budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii = Engineering staff – the future of Russia's innovative economy, 2017, no. 1, pp. 40-42 (In Russ.).

9. Lavrovskiy E.K. Ob energetike pokhodki cheloveka-operatora, osushchestvlyayemoy pri pomoshchi apparata “passivnyy” ekzoskeleton [On the energy of the gait of a human operator, carried out using the apparatus “passive” exoskeleton]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = News of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics*, 2015, no. 1, pp. 9-24 (In Russ.).

10. Lushnikov B.V, Skrylnikov N. Ye. Imitatsionnaya model' protsessa vertika-lizatsii ekzoskeleta nizhnikh konechnostei v srede Simmechanics / MATLAB s uchetom sukhogo treniya v kinemacheskikh parakh [Simulation model of the process of verticalization of the exoskeleton of the lower extremities in Simmechanics / MATLAB medium taking into account dry friction in kinematic pairs]. *Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyаемые mashiny. Sbornik nauchnykh statei po materialam XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Vibration technologies, mechatronics and controlled machines. Collection of scientific articles based on the Materials of the XI International scientific and technical conference], Kursk, 2016, pp. 261-271 (In Russ.).

11. Pavlovsky V.E. et al. Biomekhatronnyy kompleks neyrorabilitatsii—kontseptsiya, konstruktsiya, modeli i upravleniye [Biomechatronic neurorehabilitation complex — concept, construction, models and control]. *Preprinty Instituta prikladnoy matematiki im. MV Keldysha RAN = Preprints of the Institute of Applied Mathematics named after MV Keldysh RAS*, 2014, no. 10, pp. 111-19 (In Russ.).

12. Vitiello N., Lenzi T., Roccella S., De Rossi S. M.M., Cattin E., Giovacchini F., Vecchi F. Moscow, Carrozza NEUROExos: A powered elbow exoskeleton for physical rehabilitation. *Robotics, IEEE Transactions on* 29, no. 1 (2013), pp.220-235.

13. Pavlovskiy V.Ye., Platonov A.K., Aliseychik A.P., Orlov I.A., Pavlovskiy V.V., Ptakhin A.A. Neyrorabilitatsionnyy kompleks: struktura, upravleniye dvizheniyem ekzoskeletnykh moduley [Neurorehabilitation complex: structure, motion control of exoskeletal modules]. *Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyаемые mashiny. Sbornik nauchnykh statei po materialam XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Vibration technologies, mechatronics and controlled machines. Collection of scientific articles based on the Materials of the XI International scientific and technical conference]. Kursk, 2014, pp. 312-322 (In Russ.).

14. Lavrenov R.O., Magid Ye.A., Matsuno F., Svinin M.M., Sutakorn D. Razrabotka i implementatsiya splayn-algoritma planirovaniya puti v srede ROS/GAZEBO [Development

and implementation of the spline-path planning algorithm in the ROS / GAZEBO environment].

Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 57-84 (In Russ.).

15. Khusainov R.R., Klimchik A.S., Magid Ye.A. Optimizatsiya parametrov dvizheniya dvunogogo shagayushchego robota [Optimization of motion parameters of a biped walking robot]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2018, no. 13 (223), pp. 119-125 (In Russ.).

16. Zoss A.B., Kazerooni H., Chu A., Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2006, no. 11(2), pp.128-138.

17. Aliseychik A.P. i dr. Mekhanika i upravleniye ekzoskeletami nizhnikh konechnostey dlya neyroreabilitatsii spinal'nykh bol'nykh [Mechanics and control of exoskeletons of the lower extremities for neurorehabilitation of spinal patients]. *XI Vserossiyskiy s"yezd po fundamental'nykh problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki. Sbornik* [XI All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Collection]. Kazan, 2015, pp. 132-134 (In Russ.).

18. Borisov A. V., Rozenblat G. M., Chigarev A. V. Primeneniye matrichnogo metoda i rekurrentnogo algoritma k modeli ploskogo mnogozvennogo mekhanizma so zven'yami peremennoy dliny, dvizhushchegosya po gorizontally ploskosti [Application of the matrix method and the recurrent algorithm to the model of a plane-multipurpose mechanism with lines of variable length moving on a horizontal plane]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika. Nauchno-tekhn. sbornik* [Theoretical and applied mechanics. International scientific and technical collection]. Minsk, 2018, pp. 370-380 (In Russ.).

19. Borisov A.V. Mekhanika prostranstvennoy modeli ekzoskeleta i antropomorfnoy robota [The mechanics of the spatial model of the exoskeleton and anthropomorphic robot]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu = Questions of defense technology. Series 16: Technological Tools for Combating Terrorism*, 2018, no. 3-4, pp. 46-55 (In Russ.).

20. Aliseychik A.P. Orlov I.A. Kolesnichenko Ye.Yu. Pavlovskiy V.Ye. Pavlovskiy V.V. Platonov A.K. Reabilitatsionnyy ekzoskelet BioMekh: modeli, upravleniye, konstruktziya, eksperiment [Rehabilitation exoskeleton BioMech: models, management, design, experiments]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye = Mechatronics, automation, control*, 2016, no.17(10), pp. 670-677 (In Russ.).

21. Vorob'yev A.A., Petrukhin A.V., Zasyapkina O.A., Krivonozhkina P.S. Osnovnyye kliniko-anatomicheskiye kriterii dlya razrabotki ekzoskeleta verkhney konechnosti [The

main clinical and anatomical criteria for the development of the exoskeleton of the upper limb]. *Zhurnal anatomii i gistopatologii = Journal of anatomy and histopathology*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 20-26 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergei F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Локтионова Оксана Геннадиевна, доктор технических наук, профессор, проректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: log@swsu.ru

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Vice-rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: log@swsu.ru

Аль Манджи Халиль Хамед Мохаммед, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail teormeh@inbox.ru

Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

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

Карлов Андрей Евгеньевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail teormeh@inbox.ru

Andrey E. Karlov, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-148-160>

Методологические подходы к управлению региональной социально-экономической системой

Е.Э. Аверченкова¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет"
бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Данная работа представляет собой описание методологии управления региональной социально-экономической системой на основе принципов и понятий теории управления.

Методы. Разработанная методология управления региональной социально-экономической системой отличается учетом воздействующего влияния Национальных проектов в условиях влияния внешней среды. Методология состоит из шести этапов и четырнадцати методик, позволяющих описать систему управления региональной социально-экономической системой в терминах и инструментарием теории управления: сам регион рассматривается как объект управления, испытывающий на себе управляющее воздействие, формируемое под неким воздействующим влиянием. Также методология предполагает формализацию системы отрицательной обратной связи и систему контроля в разработанной модели управления региональной социально-экономической системой.

Результаты. Методология управления региональной социально-экономической системой может быть использована в управленческом процессе. Так, лица, принимающие управленческие решения на региональном уровне, как правило, опираются на собственные профессиональные навыки, прошлый опыт, интуицию. Однако эвристический подход к региональному управлению может быть расширен возможностями разработанной методологии, практическая реализация которой может быть представлена в виде системы поддержки принятия решений. Это позволит региональным правительствам на основании мониторинга состояния социально-экономических систем повысить эффективность принимаемых управленческих решений.

Заключение. Методология управления региональной социально-экономической системой обеспечивает полный управленческий цикл: от формализации основных понятий до описания системы контроля и обратной связи. Информационная реализация методологии представляется в виде автоматизированного продукта – системы поддержки принятия решений, который может быть использован при формировании автоматизированного рабочего места госслужащих.

Ключевые слова: методология управления; региональная социально-экономическая система; Национальные проекты.

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

Для цитирования: Аверченкова Е.Э. Методологические подходы к управлению региональной социально-экономической системой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 148-160. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-148-160>.

Поступила в редакцию 25.11.2019

Подписана в печать 09.12.2019

Опубликована 23.12.2019

Methodological Approaches to Regional Socio-Economic System Management

Elena E. Averchenkova ¹ ✉

¹ Bryansk State Technical University
50 Let Oktyabrya av. 7, Bryansk 241035, Russian Federation

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. This paper is a description of the methodology for regional socio-economic system management based on the principles and concepts of management theory.

Methods. A methodology for regional socio-economic system managing has been developed, taking into account the impact of National projects and the influence of the external environment. The methodology consists of six stages and fourteen techniques that allow describing the regional socio-economic system management in terms and tools of the management theory: the region itself is considered as an object of management experiencing a controlling action formed under some affecting influence. The methodology also assumes the formalization of a negative feedback system and a control system in the developed model of regional socio-economic system management.

Results. The methodology of managing the regional socio-economic system can be used in the management process. Those who make management decisions at the regional level usually rely on their own professional skills, past experience, and intuition. However, the heuristic approach to regional management can be extended by the capabilities of the developed methodology, the practical implementation of which can be presented as a decision support system. This will allow regional governments to improve the effectiveness of management decisions based on monitoring the state of socio-economic systems.

Conclusion. The methodology for managing the regional socio-economic system provides a complete management cycle: from the formalization of basic concepts to the description of the control and feedback system. The information implementation of the methodology is presented in the form of an automated product – a decision support system – that can be used in the formation of an automated workplace for civil servants.

Keywords: management philosophy; regional social and economic system; national projects.

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

For citation: Averchenkova E. E. Methodological Approaches to Regional Socio-Economic System Management. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 148-160 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-148-160>.

Received 25.11.2019

Accepted 09.12.2019

Published 23.12.2019

Введение

Применение понятий теории управления существенно расширяет возможности исследователей, предоставляя им четкий аппарат формализации системы управления региональной со-

циально-экономической системой (далее РСЭС). Условием применения теории управления для описания системы управления региональной социально-экономической системой (далее СУ РСЭС) является наличие и возможность формализованного описания причинно-

следственных связей, четко определяемых элементов (например, объекта управления, задающего воздействия, исполнительного элемента и проч.), а также логической структуры взаимоотношений элементов системы. Однако методологические вопросы, позволяющие описать систему управления, а также «назначить» соответствующие управленческие решения при компенсации «ошибки» системы, остаются открытыми. Ранее методы принятия управленческих решений на региональном уровне характеризовались преобладанием эвристических подходов, однако современные реалии динамичных изменений во внешней среде вкупе с комплексом задач, поставленных в Национальных проектах РФ, требуют от региональных правительств строгого обоснования их управленческих действий. Таким образом, можно говорить о необходимости разработки и внедрения методологии управления региональной социально-экономической системой на основе оценки влияния внешней среды.

Изучение научных источников в области прикладных аспектов применения теории управления к вопросам управления регионами показало их недостаток и ограниченность узкой тематикой. Так, с одной стороны, можно говорить, что систематическое изложение структуры теории управления социально-экономическими системами было дано в работах отечественных ученых Института проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова. Первоначальное представление о задачах и методах теории управления организационными си-

стемами было приведено в работах Буркова В.Н., Коргина Н.А., Новикова Д.А. [1,2]. Современное состояние теории управления организационными системами получило свое развитие в работах Воронина А.А., Губко М.В., Мишина С.П., Новикова Д.А. [3]. Развитие тематики распределенных систем принятия решений в управлении региональным развитием получило в работах Гилева С.Е., Леонтева С.В., Новикова Д.А. [4].

С другой стороны, современные тенденции управления организационными системами связаны с комплексной оценкой политико-правового воздействия внешнего окружения на региональную социально-экономическую систему. Результаты теоретического исследования моделей и методов управления организационными системами находят свое применение при решении широкого круга практических задач в самых разных областях, например для описания процессов эффективного управления предприятиями, корпорациями, а также регионами, например, в работах Буркова В.Н., Данева Б., Еналеева А.К., Чхартисвили А.Г. Аналогичные исследования встречаем в работах зарубежных авторов Clemen R., Goodwin P., Hamdy A., Raiffa H., Smith J.Q. и др. [5-12].

Однако обзор работ в области формализации управления региональной социально-экономической системой (РСЭС) выявил определенные резервы в развитии этого направления, что позволило сформировать основные противоречия, обуславливающие актуальность данного исследования.

Во-первых, отсутствие методологии, позволяющей комплексно подойти к проблемам управления РСЭС, в том числе на основе современных инструментов государственного воздействия на регионы и страну в целом - Национальных проектов. При такой постановке определяются условия эффективного развития региона РФ по достижению целевых показателей, заданных комплексом Национальных проектов, а также предполагаемые управляющие воздействия по достижению желаемого состояния региональной социально-экономической системы.

Во-вторых, отсутствие методологии управления РСЭС, позволяющей обеспечить достижение целевых ориентиров Национальных проектов по РСЭС, в том числе за счет:

а) динамичности и объективности оценки происходящих в РСЭС изменений под влиянием внешней среды;

б) оперативного принятия управленческих решений на разных уровнях вертикали власти на основе оценки влияния внешней среды.

Следовательно, возникает необходимость создания методологии управления РСЭС на основе принципов и понятий теории управления с учетом целевых установок воздействующего влияния Национальных проектов в условиях внешней среды.

Постановка проблемы исследования

Данная статья продолжает исследования в области применения теории управления к специфике регионов. Так, в работах автора [5,6] показано, в чем

состоят особенности использования понятий и принципов теории управления к описанию субъектов РФ типа «область».

Определим, что в общем виде модель СУ РСЭС может быть описана на основе теоретико-множественного подхода следующим кортежем:

$$СУ_{РСЭС} = \langle K, U, Y, G, \Theta, C \rangle, \quad (1)$$

где K – множество компонентов СУ РСЭС, $K = \{OU, UU, BC, \{KU_\sigma | \sigma = 1, 2\}, \{IU_\vartheta | \vartheta = 1, 2, 3\}\}$, OU – объект управления (РСЭС), UU – управляющее устройство (система поддержки принятия решений «ДАТА»); BC – внешняя среда; KU_σ ($\sigma = 1, 2$) – два контролируемых устройства; IU – исполнительное устройство (абстрактный госслужащий); IU_ϑ ($\vartheta = 1, 2, 3$) – три измерительных устройства; U – множество входов, $U = \{\overline{u_m(t)} | m = 1, 2, \dots, 14\}$

$$\text{или } U = \left\| u_{mn} \right\|_{m=1, n=1}^{14 \times 69},$$

где $\overline{u_m(t)}$ – векторы управленческого воздействия, сгруппированные по 14 группам в соответствии с классификатором составляющих РСЭС; U_{mn} – управляющее воздействие на S_{mn} – составляющую РСЭС; Y – множество выходов, $Y = \{y_1, y_2\}$; $g(t)$ – задающее воздействие Национальных проектов на РСЭС, $g(t) = (g_1(t), \dots, g_{13}(t))$; Θ – множество воздействий внешней среды на OU через UU ,

$$\Theta = \left\{ \left\| f_{ijk}(t) \right\|_{i=1, j=1, k=1}^{9 \times 21} \right\},$$

$$\{f_{iu\vartheta}(t) | \vartheta = 1, 2, 3\} \{ \delta_\omega(t) | \omega = 1, 2, 3 \};$$

C – система обратной связи

$$C = \langle \overline{\varepsilon(t)}, \overline{y_1(t)}, \overline{g(t)} | \overline{\varepsilon(t)} \rightarrow 0 \rangle, \quad \varepsilon(t) -$$

ошибка (рассогласование) в траектории выходного вектора $\overline{y_1(t)}$ от вектора задающего воздействия $\overline{g(t)}$, представ-

ленного Национальными проектами РФ. Визуальное представление модели СУ РСЭС представлено на рис. 1.

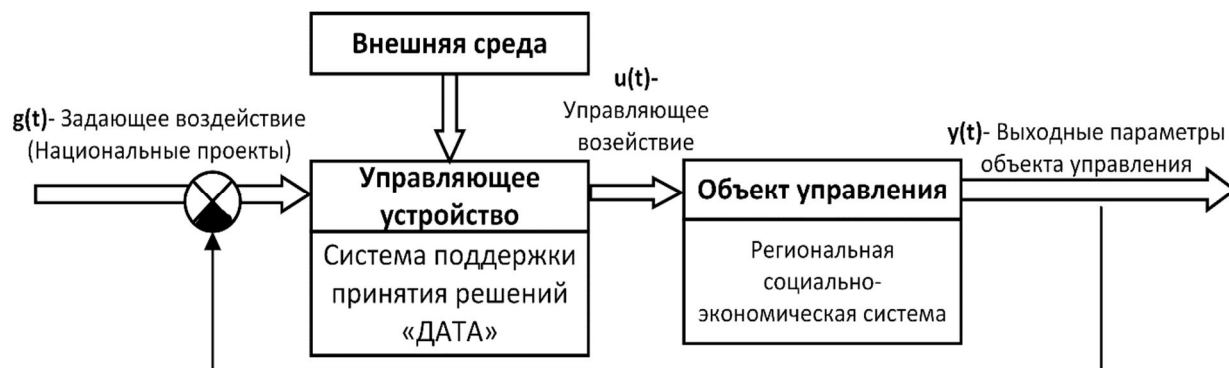


Рис.1. Система управления региональной социально-экономической системой

Fig. 1. The system of regional socio-economic system management

Задающее воздействие $g(t)$ в разработанной СУ РСЭС представлено целевыми установками Национальных проектов РФ. Оно поступает на управляющее устройство – систему поддержки принятия решений (далее СППР «ДАТА» [13,14]) и через систему обратной отрицательной связи корректируется ошибкой $\overline{E(t)}$. Внешняя среда порождает внешние возмущающие воздействия различной природы. Основные возмущения $\overline{f(t)}$ учитываются (компенсируются) управляющим устройством системы, представленным СППР «ДАТА». Управляющее устройство формирует управляющее воздействие $\overline{u(t)}$ на объект управления, РСЭС и представлено системой поддержки принятия решений «ДАТА» (СППР «ДАТА»). Исполнительное устройство в разработанной СУ РСЭС представлено абстрактным государственным служащим – руководите-

лем низового и среднего звена – который на практике является пользователем СППР «ДАТА», обращается к ней в процессе принятия управленческих решений для формирования управляющих воздействий $\overline{u(t)}$. Векторы выходных координат $\overline{y_{\varphi}(t)}$ суммируются и в виде единого вектора $\overline{Y(t)}$ оказывают влияние на внешнюю среду: так проявляется дуалистичная природа РСЭС одновременно как объекта, так и субъекта управления.

Материалы и методы

Общий вид математической модели описания динамики системы управления региональной социально-экономической системы

Для математического описания динамических характеристик СУ РСЭС предлагается следующая система:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) = \|f_{ijk}(t)\|_{i=1,j=1,k=1}^{9 \times 21} \\ f_{i3}(t) = (\overline{f_{i31}(t)}, \overline{f_{i32}(t)}, \overline{f_{i33}(t)}) \\ \delta(t) = (\delta_1(t), \delta_2(t), \delta_3(t)) \\ u(t) = (\{ \overline{u_m(t)} | m = 1, 2, \dots, 14 \}, \delta_4(t)) \\ y(t) = (\overline{y_1(t)}, \overline{y_2(t)}, \delta_5(t)) \\ \varepsilon(t) = (\varepsilon_1(t), \dots, \varepsilon_k(t)) \\ g(t) = (g_1(t), \dots, g_{13}(t)), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $f_{ijk}(t)$ – k -ое возмущение j -й подгруппы i -й группы основных возмущений внешней среды, $i = 1, 2, \dots, 5, i + j = 9, k = 21, i, j, k \in N$;

$\delta_1(t), \delta_2(t), \delta_3(t)$ – помехи (шумы), имеющие статистический характер, изменяют $f(t)$ в допустимых пределах; $u(t)$ – вектор управляющего воздействия; $\delta_4(t)$ – помехи (шумы), имеющие статистический характер, изменяют $u(t)$ в допустимых пределах; $y(t)$ – вектор выходных координат объекта управления; $\delta_5(t)$ – помехи (шумы), имеющие статистический характер, изменяют $y(t)$ в допустимых пределах; $\varepsilon(t)$ – ошибка (рассогласование) в траектории выходного вектора $\overline{y(t)}$ от вектора задающего воздействия $\overline{g(t)}$, представленного Национальными проектами РФ.

Результаты и их обсуждение

Методология управления СУ РСЭС

В работах Новикова Д.А., развивающего теорию управления социально-экономическими системами, рассматриваются ее структурные компоненты, а также предлагается порядок организации процесса управленческой деятельности. Новиков Д.А. определяет мето-

дологию управления как учение об организации управленческой деятельности. В таких работах, как «Методология» [15], «Методология научного исследования» [16], «Методология управления» [17] предложена последовательность, определяющая методологию организации процесса управленческой деятельности. Принимается общая постановка вопроса о разбиении процесса управленческой деятельности с точки зрения временной структуры, предполагающей выделение фаз, стадий, этапов и циклов управленческой деятельности. Однако с учетом выявленной в данном научном исследовании специфики функционирования СУ РСЭС в работе предлагается собственная трактовка методологии управления социально-экономическими системами. Определена необходимость учета специфики региональных социально-экономических систем, что требует от предложенной методологии применение терминов и понятий разработанной СУ РСЭС, в том числе используемых в теории управления (например, объект управления, исполнительное устройство и проч.). Также нельзя не отметить, что значимое место в разработанной методологии занимает

текущая деятельность, ориентированная на достижение оперативных, тактических и стратегических целевых установок (например, описание особенностей процесса поддержки принятия региональных управленческих решений с применением СППР «ДАТА»). Еще одним авторским отличием предлагаемой методологии является применение четкой логической связи «элементы методологии – методика – метод», которая позволяет увидеть не только структуру этапов, но и их содержательную и методическую составляющую (табл.).

Разработанная методология управления РСЭС на основе оценки влияния

внешней среды включает в себя шесть основных этапов:

1. Формализация задающего воздействия Национальных проектов в СУ РСЭС.
2. Проектирование основных компонентов и информационных потоков СУ РСЭС.
3. Принятие управленческих решений на региональном уровне по отношению к РСЭС.
4. Оценка состояния внешней среды РСЭС.
5. Контроль эффективности функционирования СУ РСЭС.
6. Формирование обратной связи в СУ РСЭС.

Таблица. Фрагмент методологии управления региональной социально-экономической системой на основе оценки влияния внешней среды

Table. A part of the methodology for regional socio-economic system management on the basis of the assessment of the environmental effect

Этапы методологии / Methodology's stages	Разработанные методики / Developed methods	Содержание методик / Content of techniques	Применяемые методы / Applicable methods
1. Формализация задающего воздействия Национальных проектов в СУ РСЭС	1.1. Методика формализации задающего воздействия Национальных проектов РФ в СУ РСЭС	1.1.1. Определение целевых показателей Национальных проектов в качестве задающего воздействия СУ РСЭС 1.1.2. Соотнесение целевых показателей Национальных проектов РФ с составляющими РСЭС для последующей выработки управленческого воздействия 1.1.3. Определение целевых показателей Национальных проектов в части классификатора составляющих РСЭС 1.1.4. Определение понятия и функционала целевых показателей Национальных проектов в модели КУ №1	метод сравнительного анализа; методы теории управления; метод иерархической классификации

Продолжение табл. / Continuation of table

Этапы методологии / Methodology's stages	Разработанные Методики / Developed methods	Содержание методик / Content of techniques	Применяемые методы / Applicable methods
2. Проектирование основных компонентов и информационных потоков СУ РСЭС	2.1.Методика моделирования СУ РСЭС	2.1.1.Формализованное представление модели СУ РСЭС 2.1.2.Построение структурно-функциональной модели СУ РСЭС 2.1.3.Разработка модели динамических характеристик СУ РСЭС 2.1.4.Формирование принципов управления СУ РСЭС 2.1.5.Определение траектории развития СУ РСЭС по достижению целевых установок Национальных проектов в условиях неопределенности влияния внешней среды 2.1.6.Формирование основных критериев эффективного функционирования СУ РСЭС в части достижения целевых установок Национальных проектов РФ 2.1.7.Принятие принципа ограничения функционирования СУ РСЭС по ресурсам, задействованным в них	методы теории управления; теоретико-множественный метод; метод сравнительного анализа; методы теории управления; методы математического анализа
	2.2.Методика описания объекта управления (РСЭС)	2.2.1.Формализованное представление модели объекта управления (РСЭС) 2.2.2.Разработка классификатора составляющих объекта управления (РСЭС) на основе предложенного автором подхода 2.2.3.Построение структурно-функциональной модели объекта управления (РСЭС) 2.2.4.Разработка модели структурных динамических связей объекта управления (РСЭС) 2.2.5.Формулировка основной задачи разработанной СУ РСЭС в части объекта управления (РСЭС) 2.2.6.Определение области допустимых состояний объекта управления (РСЭС) как объекта управления. 2.2.7.Формирование динамических характеристик управляющего воздействия на объект управления (РСЭС) и его выходных координат	методы теории управления; методы математического анализа; метод иерархической классификации; теоретико-множественный метод

Этапы методологии / Methodology's stages	Разработанные Методики / Developed methods	Содержание методик / Content of techniques	Применяемые методы / Applicable methods
	2.3.Методика описания внешней среды РСЭС	2.3.1.Формализованное представление модели основных элементов внешней среды РСЭС (факторов, основных возмущений, помех) 2.3.2.Разработка классификатора факторов внешней среды РСЭС на основе предложенного автором подхода 2.3.3.Построение структурно-функциональной модели формирования возмущений внутри внешней среды РСЭС 2.3.4.Построение структурно-функциональной модели внешней среды РСЭС	теоретико-множественный метод; методы нечеткой логики; метод корреляционно-регрессионного анализа; метод иерархической классификации; методы теории управления; методы математического анализа
...	...	...	...
4.Формирование системы обратной связи в СУ РСЭС	4.1.Определение величины и характера ошибки (рассогласования)	4.1.1. Формализация ошибки (рассогласования) в траектории выходного вектора от вектора задающего воздействия Национальных проектов РФ 4.1.2. Расчет величины ошибки (рассогласования) траектории выходного вектора от вектора задающего воздействия Национальных проектов РФ	теория управления; теоретико-множественный подход
	4.2. Коррекция ошибки (рассогласования)	4.2.1. Корректировка данных, поступающих в управляющее устройство – СППР «ДАТА», о наличии ошибки (рассогласования) 4.2.2. Корректировка управляющего воздействия, поступающего на объект управления	теория управления

В рамках обозначенных этапов в разработанной методологии были сформированы 14 методик. Разработанная методология управления РСЭС на основе оценки влияния внешней среды, позволяет реализовать процесс поддержки принятия региональных управленческих решений с применением раз-

работанной СППР «ДАТА» под воздействием Национальных проектов.

Пример воздействующего влияния Национальных проектов на РСЭС на основе оценки влияния внешней среды

Представленная методология управления РСЭС на основе оценки влия-

ния внешней среды может быть проиллюстрирована на следующем примере (рис.2). Так, будет показано, как реализуется воздействующее влияние Национальных проектов на РСЭС на основе оценки влияния внешней среды. Пусть экспертная оценка влияния возмущения внешней среды $f_{412}(t)$ = «Уровень здоровья населения региона» на РСЭС показала сильное влияние на группу S_4

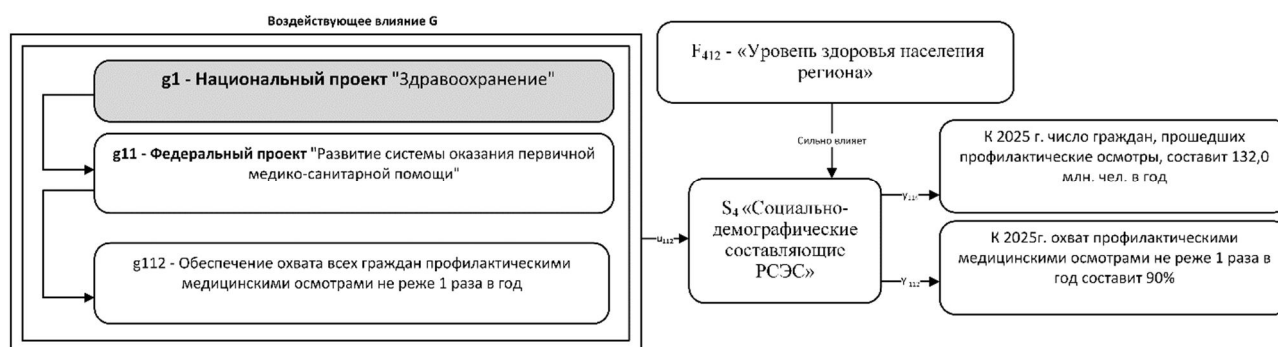


Рис. 2. Влияние воздействующего влияния $\overline{g_{11}(t)}$ «Федеральный проект «Развитие системы оказания первичной медико-санитарной помощи» на группу S_4 «Социально-демографические составляющие РСЭС»

Fig. 2. Impact of the affecting influence $\overline{g_{11}(t)}$ "Federal project "Development of primary health care system" on group S_4 " Socio-demographic components of RSES"

Под влиянием воздействующего влияния $\overline{g_{112}(t)}$ = «Обеспечение охвата всех граждан профилактическими медицинскими осмотрами не реже 1 раза в год» в СУ РСЭС управляющим устройством (СППР «ДАТА») формируется управляющее воздействие $u_{112}(t)$ в виде продукционных правил для S_4 «Социально-демографические составляющие РСЭС», обеспечивающих проведение соответствующих мероприятий. Лингвистические значения выходных параметров определяются в Федеральном проекте «Развитие системы оказания первичной медико-санитарной помощи» как целевые установки. Таким

образом, на выходе РСЭС будут сформированы выходные координаты $y_{112}(t)$ = «К 2025г. число граждан, прошедших профилактические осмотры, составит 132,0 млн.чел. в год» и $y_{114}(t)$ = «К 2025г. охват профилактическими медицинскими осмотрами не реже 1 раза в год составит 90%». Выходные координаты, теперь уже в качестве входного сигнала для внешней среды, окажут на нее воздействие: влияние фактора внешней среды F_{412} «Уровень здоровья населения региона» на РСЭС снизится. Таким образом, возникает динамика возмущения внешней среды $f_{412}(t)$, т.е. можно говорить об

изменении начального состояния возмущения $f_{412}(t_z)$, оцениваемого как «сильное влияние» в состояние $f_{412}(t_{z+1})$, которое теперь оценивается как «среднее влияние». Тогда Δf_{ijk} представляет собой смещение нечетких понятий «сильное влияние» в «среднее влияние».

Выводы

Предложенная методология управления РСЭС на основе оценки внешней среды расширяет возможности применения теории управления применительно к описанию субъектов РФ. Так, научная ценность разработанной мето-

дологии представляет собой предложенные автором подходы к описанию процессов формализации элементов СУ РСЭС, системы обратной связи и контроля, оценки влияния внешней среды на РСЭС. Новизна методологии определяется учетом влияния внешней среды в условиях реализации Национальных проектов в процессе управления РСЭС. Особенностью практической реализации предлагаемой методологии является обеспечение процесса поддержки принятия региональных управленческих решений с применением разработанной СППР «ДАТА» под воздействием Национальных проектов.

Список литературы

1. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами / под ред. Д.А. Новикова. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 264 с.
2. Новиков Д. А. Структура теории управления социально-экономическими системами // УБС. 2009. № 24. С. 216–257.
3. Мишин С.П. Оптимальные иерархии управления в социально-экономических системах. М.: ПМСОФТ, 2004. 230 с.
4. Гилев С.Е., Леонтев С.В. Распределенные системы принятия решений в управлении региональным развитием. М.: ИПУ РАН, 2002. 54 с.
5. Hamdy A. Taha. Chapter 14. Game theory and decision making // Introduction to operations research = Operations Research: An Introduction. 7-e Izd. M.: "Williams", 2007. P. 549-594. ISBN 0-13-032374-8.
6. Sven Ove Hansson. "Decision Theory: A Brief Introduction". Available at: <https://web.archive.org/web/20060705052730/http://www.infra.kth.se/~soh/decisiontheory.pdf>
7. Paul Goodwin, George Wright. Decision Analysis for Management Judgment, 3rd edition. Chichester: Wiley, 2004 ISBN 0-470-86108-8 (covers both normative and descriptive theory).
8. Robert Clemen. Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis, 2nd edition. Belmont CA: Duxbury Press, 1996. (covers normative decision theory).
9. Brams S.J., Taylor A. Fair Division. Cambridge University Press, New York, 1996.

10. Raiffa H. Decision Analysis: Introductory Readings on Choices Under Uncertainty. McGraw Hill, 1997.
11. Roth A., Sotomayor M.O. Two-sided matching, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
12. Smith J.Q. Decision Analysis: A Bayesian Approach. Chapman and Hall, 1988.
13. Аверченкова Е.Э., Горбунов А.Н. Применение теории управления для описания системы управления региональной социально-экономической системой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №23(4). С. 105-115. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>.
14. Аверченкова Е.Э., Аверченков А.В. Концептуальная модель оценки влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №9. С. 148-153.
15. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. М.: СИНТЕГ, 2007. 668 с.
16. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. М.: Либроком, 2010. 280 с.
17. Новиков Д.А. Методология управления. М.: Либроком, 2011. 128 с. (Серия «Умное управление»).

References

1. Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. Vvedenie v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami [Introduction to the theory of management of organizational systems]. Moscow, Knizhnyi dom "LIBROKOM" Publ., 2009, 264 p. (In Russ.).
2. Novikov D. A. Struktura teorii upravleniya sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami [Structure of the theory of management of socio-economic systems]. UBS, 2009, no.24, pp. 216-257 (In Russ.).
3. Mishin S. P. *Optimal'nye ierarkhii upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh* [Optimal hierarchies of management in socio-economic systems]. Moscow, PMSOFT Publ., 2004, 230 p. (In Russ.).
4. Gilev S. E., Leontev S. V. Raspredelennye sistemy prinyatiya reshenii v upravlenii regional'nym razvitiem [Distributed decision-making systems in regional development management]. Moscow, IPU RAN Publ., 2002, 54 p. (In Russ.).
5. Hamdy A. Taha. Chapter 14. Game theory and decision making. Introduction to operations research = Operations Research: An Introduction. 7-e Izd. Moscow, Williams Publ., 2007, pp. 549-594. ISBN 0-13-032374-8.
6. Sven Ove Hansson. "Decision Theory: a Brief Introduction". Available at: <https://web.archive.org/web/20060705052730/http://www.infra.kth.se/~soh/decisiontheory.pdf>.
7. Paul Goodwin and George Wright. Decision Analysis for Management Judgment, 3rd edition. Chichester, Wiley, 2004. ISBN 0-470-86108-8 (covers both normative and descriptive theory).

8. Robert Clemen. Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis, 2nd edition. Belmont CA, Duxbury Press Publ., 1996 (covers normative decision theory).
9. Brams S. J., Taylor A. Fair Division. Cambridge University Press, New York, 1996.
10. Raiffa H. Decision Analysis: Introductory Readings on Choices Under Uncertainty. McGraw Hill, 1997.
11. Roth A., Sotomayor M. O. Two-sided matching, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
12. Smith J. Q. Decision Analysis: A Bayesian Approach. Chapman and Hall, 1988.
13. Averchenkova E. E., Gorbunov A. N. Primenenie teorii upravleniya dlya opisaniya sistemy upravleniya regional'noi sotsial'no-ekonomicheskoi sistemoi [Application of Control Theory to Describe the Management of the Regional Socio-Economic System]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 23(4), pp.105-115 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>.
14. Averchenkova E. E., Averchenkov A.V. Kontseptual'naya model' otsenki vliyaniya vneshnei sredy na regional'nyu sotsial'no-ekonomicheskuyu sistemu [Conceptual model for assessing the impact of the external environment on the regional socio-economic system]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU. V. G. Shukhova*, 2016, no. 9, pp. 148-153 (In Russ.).
15. Novikov A. M., Novikov D. A. *Metodologiya* [Methodology]. Moscow, SINTEG Publ., 2007. 668 p. (In Russ.).
16. Novikov A. M., Novikov D. A. *Metodologiya nauchnogo issledovaniya* [Methodology of scientific research]. Moscow, Librokom Publ., 2010, 280 p. (In Russ.).
17. Novikov D. A. *Metodologiya upravleniya* [Methodology of management]. Moscow, Librokom Publ., 2011, 128 p. (series " Smart control») (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет", г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: lena_ki@inbox.ru
ORCID 0000-0003-2098-6156

Elena E. Averchenkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Economics, Organization of Production and Management, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: lena_ki@inbox.ru
ORCID 0000-0003-2098-6156

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>

Обобщенные теоретические модели киберфизических систем

И.В. Ватаманюк ¹ ✉, Р.Н. Яковлев ¹

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

✉ e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является попытка унифицировать существующие видения киберфизических систем, ввести формальные модели киберфизических систем, рассмотреть сходства и отличия этого понятия со смежными информационно-технологическими концепциями.

Методы. В работе рассмотрены существующие видения киберфизических систем, их взаимосвязь со смежными информационно-технологическими концепциями, в частности, с «Интернетом вещей». Для решения поставленной задачи декомпозиции видений данных систем были использованы средства системного анализа и аппарат теории множеств.

Результаты. В работе описаны высокоуровневая и теоретико-множественная модели киберфизических систем. Высокоуровневая модель системы описывает взаимосвязь между пользователями, преобразователями, логическим и физическим уровнями. Центральное место в киберфизических системах занимают преобразователи, которые предназначены для взаимодействия между логическими и физическими компонентами и представляют собой датчики и исполнительные механизмы. Множественная модель киберфизических систем учитывает возможность обмена энергией и информацией между компонентами. Кроме того, в работе предложена обобщенная динамическая модель функционирования киберфизической системы, отражающая процессы изменения состояния ее компонентов под воздействием влияния внешней среды и внутренних факторов.

Заключение. Предложенная теоретико-множественная модель представляет собой основу для разработки и описания поведения киберфизических систем. Данная модель описывает взаимосвязь компонентов киберфизических систем и показывает влияние одного из параметра на все функциональные компоненты, с которыми данный параметр ассоциирован. Таким образом, для «интеллектуализации» окружения необходимо разработать ряд технических требований, учитывающий специфику функциональных компонент и роль пользователей, что позволит реализовать информационно-управляющие сервисы на основе данных об окружающей среде, поведении пользователя, его интересах и предпочтениях.

Ключевые слова: киберфизическая система; интернет вещей; распределенные системы; корпоративная информационная система; динамические модели программного управления.

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

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РНФ (№16-19-00044П).

Для цитирования: Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 161-175. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>.

Поступила в редакцию 12.11.2019

Подписана в печать 03.12.2019

Опубликована 23.12.2019

© Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н., 2019

Generalized Theoretical Models of Cyberphysical Systems

Irina V. Vatamaniuk ¹ ✉, Roman N. Iakovlev ¹

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
14-th Linia V.I. 39, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The purpose of this article is to attempt to unify the existing views of cyberphysical systems, introduce formal models of cyberphysical systems, and consider similarities and differences between this concept and related information technology concepts.

Methods. The paper considers the existing views of cyber-physical systems, their relationship with related information technology concepts, in particular, with the "Internet of things". To solve the problem of decomposition of the visions of these systems, we used the tools of system analysis and the set theory framework.

Results. The paper describes high-level and set-theoretic models of cyberphysical systems. The high-level system model describes the relationship between users, converters, and the logical and physical levels. Converters are the centerpiece of cyberphysical systems; they are designed to interact between logical and physical components and are sensors and agents. The set model of cyberphysical systems takes into account the possibility of exchanging energy and information between components. Besides, the paper offers a generalized dynamic model of the cyberphysical system functioning that reflects the processes of changing the state of its components under the influence of the environment and internal factors.

Conclusion. The proposed set-theoretic model is the basis for developing and describing the behavior of cyberphysical systems. This model describes the relationship of components of cyberphysical systems and shows the impact of one of the parameters on all functional components with which this parameter is associated. Thus, in order to "intellectualize" the environment, it is necessary to develop a number of requirements that take into account the specifics of functional components and the role of users, which will allow implementing data management services based on data about the environment, user behavior, interests and preferences.

Keywords: cyberphysical system; Internet of things; distributed systems; enterprise information system; dynamic program control models.

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 performed with the support of RSF (№16-19-00044П).

For citation: Vatamaniuk I. V., Iakovlev R. N. Generalized Theoretical Models of Cyberphysical Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 161-175 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>.

Received 12.11.2019

Accepted 03.12.2019

Published 23.12.2019

Введение

Впервые термин «киберфизическая система» (КФС, Cyber-physical system, CPS) был введен сотрудницей Национального научного фонда США (Na-

tional Science Foundation в США) Эллен Гилл для обозначения распределенной системы, в которой обработка информации происходит непосредственно в ее физических элементах [1]. Поскольку

данная концепция возникла сравнительно недавно (точкой отсчета принято считать американский симпозиум “NSF Workshop on cyber-physical systems” в 2006 году), ее развитие затрудняют терминологические разногласия, отсутствие технологических стандартов (ISO, ГОСТ, NIST) и, как следствие, отсутствие единого видения положения КФС среди других современных технологических концепций, а также демаркационных границ между этой и соседними областями. Целью данной статьи является попытка унифицировать существующие видения КФС, ввести формальные модели КФС, рассмотреть сходства и отличия со смежными информационно-технологическими концепциями.

Систематические обзоры технологий КФС [2-4] выделяют следующие области знаний, наиболее близко связанные с рассматриваемой: встроенные системы реального времени (real-time embedded systems), распределенные вычислительные системы, автоматизированные системы управления техническими процессами и объектами, беспроводные сенсорные сети, интернет вещей (Internet of Things, IoT), промышленный интернет вещей (Industrial Internet), межмашинное взаимодействие (Machine-to-Machine, M2M), туманные и облачные вычисления (fog и cloud computing), комплексные адаптивные системы, холоновые (агентные) производственные системы. Большинство исследователей указывают, что понятие

«киберфизическая система» развилось из области встроенных систем реального времени [2]. Вполне естественно, что следующим шагом эволюционирования таких систем стало объединение разрозненных устройств в единую вычислительную сеть и обеспечение их взаимодействия посредством интернет-протоколов (интернет вещей). Усложнение способов взаимодействия между вычислительными и физическими элементами и породило потребность в новом междисциплинарном подходе.

Как уже было отмечено, понятием, наиболее близким к КФС, является «интернет вещей» (Internet of Things, IoT). Термины «КФС» и «IoT» имеют разное происхождение и схожие определения, оба соответствуют тенденции интеграции цифровых возможностей, включая сетевое подключение и вычислительные мощности, в физические устройства и системы. Обстоятельный анализ публикаций по соответствующей тематике за последнее десятилетие [5] показывает, что среди экспертов нет единого мнения о взаимном соответствии данных терминов: встречаются мнения о частичном перекрытии значения понятий КФС и IoT [6], их эквивалентности [7], о включении понятия «КФС» в IoT [8] и обратном включении [9]. В целом, отмечается тенденция сближения понятий «КФС» и «IoT» [5] – несмотря на различие в происхождении, современные системы, рассматриваемые с точки зрения функциональности, попадают под формальное определение обо-

их терминов. Для того, чтобы понять, как соотносятся между собой различные определения КФС и IoT, рассмотрим сущности на уровне компонентов, которыми оперирует последний. К ним относятся следующие 4 категории «умных» объектов [10], определяемые их функциональностью:

- отслеживаемые объекты (Trackable Objects): однозначно идентифицируемые мобильные объекты, способные предоставлять данные в отношении своего актуального физического местонахождения;

- объекты данных (Data Objects): объекты, которые генерируют данные либо обрабатывая сигналы различного рода датчиков, либо исходя из их собственных свойств и текущего состояния;

- интерактивные объекты (Interactive Objects): объекты, которые способны взаимодействовать со средой, в которой находятся, измеряя различные параметры среды, и/или изменяя их;

- «умные» объекты (Smart Objects): интерактивные объекты, которые могут некоторым образом обрабатывать получаемые ими данные и реагировать, исходя из полученной в результате обработки соответствующих данных информации [10].

Если изначально технологии IoT фокусировались на отслеживаемых объектах, то сейчас концепция расширилась и включает: объекты, оснащенные различными датчиками (объекты данных), например, бытовые приборы, генерирующие новые данные для аналитики и

создания дополнительных персонализированных функций и услуг; объекты, которые активно взаимодействуют с физическим миром через исполнительные механизмы (интерактивные объекты), например дистанционно управляемый дверной замок, а также объекты, которые имеют аналитические возможности для адаптивного и реагирующего взаимодействия («умные» объекты), например автономное транспортное средство [11].

Можно заметить, во-первых, что многие IoT-системы представляют собой так называемые системы систем (system-of-systems), в которых сами компоненты могут быть сочетанием отслеживаемых объектов, объектов данных, интерактивных или «умных» объектов. Управлять требованиями к проекту и оценить обеспечение качества обслуживания (QoS) [12, 13] для каждого такого компонента можно только в контексте общей функциональной цели и требований к взаимодействию с другими компонентами в системе. Во-вторых, включение в концепцию IoT взаимодействия между логическими и физическими компонентами сближает ее с концепцией КФС, что является следствием смещения внимания разработчиков с отслеживаемых объектов и объектов данных на интерактивные и «умные» объекты. Действительно, многие существующие IoT-решения, приводимые в качестве примеров отслеживаемых объектов или объектов данных, уместнее рассматривать как компонен-

ты интерактивной или интеллектуальной системы, если рассматривать их в функциональном контексте. В-третьих, отдельное устройство или система может относиться сразу к нескольким вышеозначенным категориям. В частности, смартфон может использоваться в качестве отслеживаемого объекта в одном приложении (например, приложении для навигации или поиска телефона), в качестве объекта данных в другом (отправка информации друзьям о вашем текущем местоположении), а также в качестве интерактивного или «умного» объекта (например, удаленное взаимодействие с системой управления энергопотреблением в доме). Таким образом, важно рассматривать «умные» объекты именно в функциональном контексте интегрированной системы.

Сравнивая суждения о терминологии КФС и IoT из различных источников, авторы [5] показывают, что проводимые различия в терминологии зависят от различий во взглядах специалистов по четырем основным вопросам: 1) управление: делается ли акцент на управлении на уровне системы; 2) платформа: является ли IoT платформой для развертывания КФС или наоборот; 3) Интернет-подключение: какие требования выдвигаются к сетевому подключению, и какая роль отводится IP-сетям в системе; 4) человек: характер и роль человеко-машинного взаимодействия в системе. В целом, подробный анализ каждого из пунктов показывает, что наиболее часто приводи-

мые аргументы недостаточны для проведения однозначной демаркационной линии между понятиями КФС и IoT [5]. Таким образом, отсутствие четких и непротиворечивых разграничительных метрик и постепенное сближение определений в литературе свидетельствуют о формирующемся консенсусе в отношении будущей интеграции современных концепций КФС и IoT. В связи с этим фактом, примем термин «киберфизическая система» для обозначения системы систем (system-of-systems), состоящей из инженерных физических систем, интегрированных с сетевыми, вычислительными системами, а также системами данных, и взаимодействующих с человеком, который может выступать в различных ролях по отношению к системе (пользователь, оператор, элемент динамического окружения и т.д.).

Материалы и методы

Национальный институт стандартов и технологий США предполагает в недалеком будущем выпустить единый стандарт для обоих классов систем КФС и IoT [5]. Единая точка зрения отражает сближение данных определений и может быть выражена следующим образом: Интернет вещей и киберфизические системы включают в себя взаимодействующие: человека (в разных ролях), а также логические, физические, преобразовательные компоненты, разработанные для функционирования посредством интегрированной логики и физики. Таким образом, унифициро-

ванная модель компонентов предусматривает 4 категории компонентов КФС и IoT: логические, физические, преобразователи и компоненты с участием человека.

Прежде чем перейти к аналитическому описанию формальной постановки задачи и теоретико-множественной модели киберфизической системы, рассмотрим высокоуровневую модель компонентов КФС (рис.). На логическом уровне КФС процессы описываются языком формальной логики и реализуются при помощи стандартных технологий сбора, преобразования и хранения информации в информационно-коммуникационных системах [14, 15]. На физическом уровне, как правило, рассматривается реализация КФС, разработанная или адаптированная для взаимодействия с ожидаемой операционной средой для достижения одной или нескольких предполагаемых целей при соблюдении ограничений, налагаемых на систему. Связующим звеном между логическим и физическим уровнями являются преобразователи – различные сенсорные устройства, датчики, собирающие данные о физическом состоянии киберфизического окружения, интерпретация которых может использоваться для изменения логического состояния системы, а также исполнительные механизмы, способные оказывать воздействия на физическое состояние такой среды. Именно преобразователи

занимают в КФС центральную роль, обеспечивая взаимодействие физических и логических компонентов. Отметим также, что присутствующая на рисунке фигура человека может представлять различные классы пользователей (стейкхолдеры, системные администраторы, пользователи, обслуживающий персонал и т.д.), взаимодействующих с системой как на информационном, так и на физическом уровне. Таким образом, представленные элементы отражают четыре основных категории компонентов КФС: логические компоненты, физические компоненты, пользователи, а также преобразователи, включающие в себя датчики и исполнительные механизмы.

Теперь рассмотрим обобщенную теоретико-множественную модель КФС. В соответствии с представленным выше определением, киберфизическая система *CPS* может быть укрупненно представлена следующим кортежем параметров:

$$CPS = \langle Ph, Lg, Sens, Act, Hum \rangle, \quad (1)$$

где *Ph* – множество физических компонентов; *Lg* – множество логических компонентов; *Sens* – множество датчиков; *Act* – множество исполнительных механизмов и *Hum* – множество лиц, вовлеченных в процессы функционирования КФС или находящихся внутри киберфизического окружения и являющихся конечными пользователями системы.

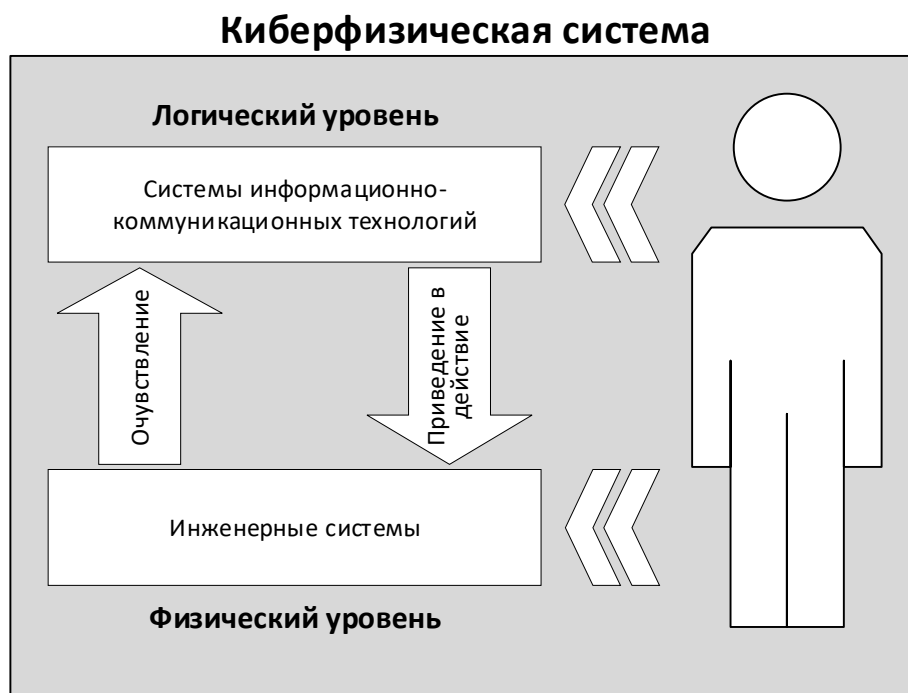


Рис. Обобщенная модель компонентов КФС

Fig. The generalized model of the CPS components

К физическим компонентам Ph относятся различного рода инженерные модули, размещенные в среде функционирования КФС, аппаратное обеспечение и его компоненты, а также сетевая инфраструктура физического уровня. Отметим также, что протекающие в данных компонентах процессы имеют исключительно физический характер и включают в себя различного рода процессы по преобразованию и передаче энергии.

Логические компоненты Lg включают в себя все уровни программного обеспечения (встроенное ПО, процессоры, драйверы, операционные системы и приложения), сети и сетевое окружение логического уровня, а также информацию на уровне данных, информации и знаний [16]. Соответственно протекающие в данных компонентах про-

цессы являются преимущественно информационными и включают в себя различные процессы по сбору, агрегации, обработке и анализу данных, а также процессы создания, получения, хранения, поиска и распространения информации.

Датчики $Sens$ и исполнительные механизмы Act , согласно [17], являются входными и выходными преобразователями соответственно. Датчики собирают информацию о физическом состоянии среды для последующей обработки на уровне логических компонентов, в то время как исполнительные механизмы изменяют его, в результате получения управляющих сигналов со стороны Lg . Модель функционирования датчиков $Sens$ может включать в себя описание процессов предобработки сигнала, аналого-цифрового преобразования, ка-

либровки, дискретизации и сопоставления метаданных. Актуаторы могут быть представлены широким рядом механических устройств, начиная от вибромотора в смартфоне или фитнес-устройстве и заканчивая сложными промышленными манипуляторами.

Взаимодействие людей с компонентами КФС включает в себя проектирование, эксплуатацию, обеспечение систем, а также взаимодействие с ними и их непосредственное использование. Так, человек может быть как пользователем системы Hum_U , так и ее компонентом Hum_C или же элементом внешней среды Hum_{Env} . Таким образом, множество Hum включает в себя три других множества различной мощности, характеризующих все многообразие пользователей:

$$Hum = \{Hum_C, Hum_U, Hum_{Env}\}. \quad (2)$$

В контексте функционирования КФС определим множество функциональных компонентов КФС F , как совокупность логических и физических компонентов системы, которые при взаимодействии формируют базовую единицу функциональности:

$$F = \{\langle Ph_i, Lg_j \rangle \mid Ph_i \subseteq Ph, Lg_j \subseteq Lg, \\ i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}. \quad (3)$$

Предполагается, что каждый функциональный компонент КФС должен обладать следующими возможностями:

- наличие вычислительных мощностей и программного обеспечения, необходимых для реализации собственных функций;

- наличие достаточного объема памяти для хранения всех необходимых для осуществления собственной деятельности данных;

- способность устанавливать сетевые соединения с другими компонентами системы и обеспечивать целевую передачу данных;

- способность к получению и сбору необходимой информации о состоянии окружающей среды и других компонентов системы;

- способность к самодиагностике в контексте выявления собственной неисправности, а также к информированию связанных компонентов в случае возникновения такой неисправности.

Каждый функциональный компонент ассоциирован с определенным набором датчиков, исполнительных механизмов и людей. Такие наборы в совокупности образуют множество преобразователей функциональных компонентов Tr :

$$Tr = \{Sens_i, Act_j, Cons_k \mid Sens_i \subseteq Sens, \\ Act_j \subseteq Act, Cons_k \subseteq Cons, \\ i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, l}, \quad (4)$$

что позволяет функциональным компонентам осуществлять различного рода преобразования на физическом и логическом уровнях в контексте взаимодействия с внешней средой и пользователями КФС, включая как обмен и преобразование энергии (механической, электрической и т.д.) – на физическом уровне, так и обмен, преобразование и синтез информации – на логическом уровне. Таким образом, для любой КФС может быть определено отображение f :

$$f: F \rightarrow Tr, \quad (5)$$

а КФС соответственно может быть охарактеризована множеством упорядоченных пар вида:

$$CPS = \{\langle F_i, Tr_i \rangle \mid F_i \in F, Tr_i = f(F_i), i = \overline{1, n}\}. \quad (6)$$

Следует отметить, что элементы любого преобразователя потенциально могут быть интероперабельными, как следствие наборы элементарных компонентов КФС, входящие в состав некоторого преобразователя, могут входить в состав неограниченного числа преобразователей иных функциональных компонентов.

Согласованное взаимодействие функциональных компонентов КФС позволяет обеспечить предоставление сервисов КФС S_{CPS} потребителям $Cons$, в качестве которых могут выступать как иные функциональные компоненты, так и люди:

$$Cons = F \cup Hum. \quad (7)$$

Стоит также отметить, что множество потребителей в общем случае может отличаться для каждого отдельного сервиса КФС:

$$Cons_S = \{Cons_i \mid Cons_i \subseteq Cons, i = \overline{1, n}\}. \quad (8)$$

Введем отображение g :

$$g: S_{CPS} \rightarrow Cons. \quad (9)$$

Поскольку сервисы КФС реализуются посредством согласованного взаимодействия различных наборов функциональных компонентов, то также может быть определено следующее отображение h :

$$h: CPS \rightarrow S_{CPS}. \quad (10)$$

Таким образом, композиция отображений $h \circ g$ позволяет установить соответствие между потребителями сервисов (будь то пользователь или другой функциональный компонент КФС) и функциональными компонентами, необходимыми для реализации соответствующих сервисов КФС.

Рассмотрим обобщенную динамическую модель функционирования КФС. Введем, согласно [18], обобщенный вектор состояния КФС и вектор выходных характеристик КФС, а также обобщенный вектор соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \left\| \begin{matrix} \bar{x}_F^T & \bar{x}_{Tr}^T \end{matrix} \right\|^T, \\ \bar{y}(t) &= \left\| \begin{matrix} \bar{y}_F^T & \bar{y}_{Tr}^T \end{matrix} \right\|^T. \end{aligned} \quad (11)$$

Допустим, некоторое изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$ приводит к изменению n различных физических параметров P_i :

$$P_{ik} = \{p_{ik} \in P_i \mid \xi_{ph}(t) \rightarrow P_i, k = \overline{1, n}\} \quad (12)$$

и регистрируется датчиками, в совокупности формирующими набор $Sens_k$:

$$Sens_{ij} = \{sens_{ij} \in Sens_i \mid P_i \rightarrow Sens_i, j = \overline{1, m}\}. \quad (13)$$

Поскольку каждый датчик $Sens_{ij}$ из набора датчиков $Sens_i$, регистрирующих изменение параметра p_{ik} , может входить в одно или сразу несколько подмножеств вида $Sens_i$, таких что $Sens_i \subseteq Tr_i$, $i = \overline{1, n}$, соответственно регистрация изменений датчик $Sens_{ij}$ приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$ с чьими преобразователями $Tr_{ij} \subseteq Tr$ ассоциирован данный датчик.

Учитывая то, что с каждым из преобразователей функциональных компонентов Tr_i , $i = \overline{1, n}$, ассоциирован целый набор датчиков $Sens_i$, то обновленное состояние $\bar{x}_F(t_1)$, каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе лишь тех изменений физических параметров среды P_{tk} , которые были зарегистрированы датчиками, принадлежащими набору $Sens_{ti}$. При этом в набор $Sens_{ti}$ входят только те датчики, которые: а) зарегистрировали изменение внешней среды ($Sens_{ti} \subseteq Sens_i$); б) принадлежат набору датчиков, входящему в состав соответствующего преобразователя функциональных компонентов Tr_i ($Sens_{ti} \subseteq Sens_i$):

$$Sens_{ti} = Sens_i \cap Sens_i. \quad (14)$$

Ответ системы на изменения информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ во многом аналогичен ответу на изменения в физической среде. Допустим, изменение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ приводит к изменению p логических параметров L_i :

$$L_{ij} = \{l_{ij} \in L_i \mid \xi_{Lg}(t) \rightarrow L_i, j = \overline{1, p}\} \quad (15)$$

и регистрируется логическими компонентами КФС $Lg_i \subseteq Lg$. Поскольку каждый логический компонент Lg_{ij} из набора Lg_i может входить в одно или сразу несколько подмножеств вида Lg_i , таких что $Lg_i \subseteq F_i$, $i = \overline{1, n}$, соответственно регистрация изменений компонентом Lg_{ij} приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$ с которыми ассоциирован данный компонент.

Учитывая то, что с каждым из функциональных компонентов F_i ассоциирован целый набор логических компонентов Lg_i , то обновленное состояние $\bar{x}_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе изменений логических параметров L_{ti} , зарегистрированных компонентами, принадлежащими набору Lg_{ti} , в который входят только те логические компоненты, которые: а) зарегистрировали изменение логических параметров ($Lg_{ti} \subseteq Lg_i$); б) принадлежат набору логических компонентов, входящему в состав соответствующего функционального компонента F_i ($Lg_{ti} \subseteq Lg_i$):

$$Lg_{ti} = Lg_i \cap Lg_i. \quad (16)$$

Отметим, что в обоих случаях изменение состояния i -го функционального компонента F_i приводит к опосредованному изменению состояний физических и логических компонентов системы, принадлежащих наборам Ph_i и Lg_i соответственно. Кроме того, переход i -го функционального компонента из состояния $\bar{x}(t_0)$ в состояние $\bar{x}(t_1)$ может индуцировать изменение выходных характеристик системы $\bar{y}(t)$, в частности, посредством активации исполнительных механизмов из набора $Act_i \subseteq Tr_i$.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования было установлено, что датчики реагируют на изменение физической среды $\xi_{Ph}(t)$, вследствие чего формируется новое состояние системы $\bar{x}(t_1)$, отражающее данные изменения, аналогичным образом осуществляется реакция системы на изме-

нение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$. Исполнительные механизмы выполняют, по сути, обратную функцию, преобразуя обобщенные управляющие сигналы системы $u_{pr}(\bar{y}(t), t)$ и $v(\bar{x}(t), t)$ (которые являются по сути планами функционирования основных элементов и управлений, реализующих планы на этапе применения в условиях возмущающих воздействий $\xi(t)$) в новое представление системы $\bar{y}(t)$ и соответствующим образом воздействуя на физическую среду, в которой функционирует КФС. Непрерывная циклическая реализация описанных в представленной модели процессов изменения состояния компонентов КФС и внешней среды и есть суть функционирования киберфизических систем.

Отметим, что несмотря на некоторую схожесть, датчики и исполнительные механизмы имеют существенное различие с точки зрения неопределенности: входные данные первых $Input_{Sens}(P)$ подвержены физической неопределенности, тогда как входные данные вторых $Input_{Act}(L)$ подвержены вычислительной неопределенности. Кроме того, модели датчиков и модели исполнительных механизмов, используемые в КФС, порождают дополнительные формы неопределенности, которые не эквивалентны друг другу. Управление этими разнородными источниками неопределенности требует разработки соответствующего формально-математического аппарата структурно-функционального синтеза сложных технических систем [18-20].

Выводы

Предложенное модельно-аналитическое обеспечение функционирования КФС представляет собой формальную основу для разработки и описания поведения КФС. Так, при проектировании CPS киберфизического окружения в масштабах территориально ограниченной организации необходима разработка средств взаимодействия множеств Ph физических компонентов, Lg логических компонентов, $Sens$ датчиков, Act исполнительных механизмов и Hum различных типов пользователей, а для реализации и оценивания качества функционирования сервисов информационно-навигационного обслуживания, предоставляемых киберфизическим окружением в условиях динамически изменяющихся состояний всех компонентов системы, требуется разработка алгоритмических моделей и программных инструментов машинного обучения для вычисления количественной оценки степени удовлетворенности пользователя от предоставленных ему сервисов.

«Интеллектуализация» окружения, таким образом, требует специализированного подхода к техническим требованиям с точки зрения функциональных компонентов и ролей пользователей и позволяет обеспечить предоставление пользователю проактивных персонализированных информационно-управляющих сервисов на основе анализа окружающей среды, поведения пользователя, исторических данных о его запросах, интересах и предпочтениях.

Список литературы

1. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach. London: MIT Press, 2016.
2. Park K.-J., Zheng R., Liu X. Cyber-physical Systems: Milestones and Research Challenges // Editorial Computer Communications. 2012. № 36(1). P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.09.006>
3. Khaitan S.K., McCalley J.D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey // IEEE Systems Journal. 2014. № 9(2). P. 350-365. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2322503>
4. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. № 6. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
5. Cyber-physical systems and Internet of Things / C. Greer, M. Burns, D. Wollman, E. Griffor // NST Special Publication. 1900. № 202. P.52. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1900-202>
6. Ma H. Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges // Journal of Computer Science and Technology. 2011. № 26(6). P. 919-924. <https://doi.org/10.1007/s11390-011-1189-5>.
7. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a definition of the Internet of Things (IoT) // IEEE Internet Initiative. 2015. №1. P. 1-86. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf
8. PICASSO Opportunity Report. Towards Enhanced EU-US ICT Pre-Competitive Collaboration. PICASSO Project; 2017 [процитировано 5 ноября 2019]. URL: http://www.picasso-project.eu/wp-content/uploads/2017/03/PICASSO-Opportunity-Report_March-2017_revMar19.pdf
9. Yeboah-ofori A., Abdulai J., Katsriku F. Cybercrime and Risks for Cyber Physical Systems: A Review. Preprints 2018. 2018. <https://doi.org/10.20944/preprints201804.0066.v1>
10. Ibarra-Esquer J.E., González-Navarro F.F., Flores-Rios B.L., Burtseva L., Astorga-Vargas M.A. Tracking the evolution of the internet of things concept across different application domains // Sensors. 2017. №17(6). P. 1379. <http://www.doi.org/10.3390/s17061379>
11. Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Мобильная робототехническая платформа как компонент киберфизического интеллектуального пространства // Экстремальная робототехника. 2017. №1. С. 37-42.
12. Vatamaniuk I.V., Malov D.A., Levonevskii D.K. Modeling the QoE Estimation for Services of the Cyberphysical Intelligent Space // Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW). 2018. P. 436-439.
13. Левоневский Д.К., Ватаманюк И.В., Малов Д.А. Обеспечение доступности сервисов корпоративного интеллектуального пространства посредством управления

потоком входных данных // Программная инженерия. 2019. № 10(1). С. 20-29. <http://www.doi.org/10.17587/prin.10.20-29>

14. Иконникова А.В., Петрова И.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение. 2008. № 11. С. 62-69.

15. Соловьева И.В., Соколов Б.В. Алгоритм коррекции планов работы корпоративной информационной системы на основе метода позиционной оптимизации // Труды СПИИРАН. 2012. №1(20). С. 153-164. <https://doi.org/10.15622/sp.20.8>

16. U.S. Access Board (2010) Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U.S. Access Board, Washington, DC); 2010 [процитировано 5 ноября 2019]. URL: <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf>

17. Pallás-Areny R., Webster J. Sensors and Signal Conditioning. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2012.

18. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

19. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S. P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications // International Journal of Production Research. 2019. №57(2). P. 411-432. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>

20. Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. <https://doi.org/10.31857/S9785907036321000001>

References

1. Lee E.A., Seshia S.A. *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. London, MIT Press Publ., 2016.

2. Park K.-J., Zheng R., Liu X. Cyber-physical Systems: Milestones and Research Challenges. *Editorial Computer Communications*, 2012, no. 36(1), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.09.006>

3. Khaitan S.K., McCalley J.D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey. *IEEE Systems Journal*, 2014, no. 9(2), pp. 350-365. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2322503>

4. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 2017, no. 6, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

5. Greer C., Burns M., Wollman D., Griffor E. Cyber-physical systems and Internet of Things. *NIST Special Publication*. 1900; 202: 52. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1900-202>.

6. Ma H. Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges. *Journal of Computer Science and Technology*. 2011; 26(6): 919-924. <https://doi.org/10.1007/s11390-011-1189-5>.

7. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a definition of the Internet of Things (IoT). *IEEE Internet Initiative*, 2015, no. 1, pp. 1-86. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf
8. PICASSO Opportunity Report. Towards Enhanced EU-US ICT Pre-Competitive Collaboration. PICASSO Project; 2017 [Quoted November 5, 2019]. Available: http://www.picasso-project.eu/wp-content/uploads/2017/03/PICASSO-Opportunity-Report_March-2017_revMar19.pdf
9. Yeboah-ofori A., Abdulai J., Katsriku F. Cybercrime and Risks for Cyber Physical Systems: A Review. *Preprints 2018*. 2018. <https://doi.org/10.20944/preprints201804.0066.v1>
10. Ibarra-Esquer J.E., González-Navarro F.F., Flores-Rios B.L., Burtseva L., Astorga-Vargas M.A. Tracking the evolution of the internet of things concept across different application domains. *Sensors*, 2017, no. 17(6), 1379 p. <http://www.doi.org/10.3390/s17061379>
11. Vatamanyuk I.V., Saveliev A.I. Mobil'naya robototekhnicheskaya platforma kak komponent kiberfizicheskogo intellektual'nogo prostranstva [Mobile robotic platform as a component of cyber-physical intellectual space]. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*, 2017, no. 1, pp. 37-42 (In Russ.)
12. Vatamaniuk I.V., Malov D.A., Levonevskii D.K. Modeling the QoE Estimation for Services of the Cyberphysical Intelligent Space. *Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW)*. 2018, pp. 436-439.
13. Levonevskiy D. K., Vatamaniuk I. V., Malov D. A. Obespechenie dostupnosti servisov korporativnogo intellektual'nogo prostranstva posredstvom upravleniya potokom vkhodnykh dannykh [Ensuring the Availability of Services of the Corporate Intellectual Space by Controlling the Flow of Input Data]. *Programmnaya Ingeneria = Software Engineering*, 2019, 10(1), pp. 20-29. (In Russ.). <http://www.doi.org/10.17587/prin.10.20-29>.
14. Ikonnikova A.V., Petrova I.A., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. Dinamicheskaya model' kompleksnogo planirovaniya modernizatsii i funktsionirovaniya informatsionnoi sistemy [A dynamic model of integrated planning for the modernization and functioning of the information system]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie = Proceedings of Higher Educational institutions: Instrumentation*, 2008, no. 11, pp. 62-69. (In Russ.).
15. Solovyeva I.V., Sokolov B.V. Algoritm korrektsii planov raboty korporativnoi informatsionnoi sistemy na osnove metoda pozitsionnoi optimizatsii [Algorithm of plan operation correction of corporate information system based on the position optimization method]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2012, no. 1(20), pp. 153-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.20.8>.
16. U.S. Access Board (2010) Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U.S. Access Board, Washington, DC); 2010 [Quoted November 5, 2019]. Available at: <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf>
17. Pallás-Areny R, Webster J. *Sensors and Signal Conditioning*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2012.

18. Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoi dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 410 p. (In Russ.).

19. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S. P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications. *International Journal of Production Research*, 2019, no. 57(2), pp. 411-432. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>.

20. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modelei i polimodel'nykh komplekso* [Qualimetry of Models and Polimodel Complexes]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2018. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S9785907036321000001>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ватаманюк Ирина Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Irina V. Vatamaniuk, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

Яковлев Роман Никитич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Roman N. Iakovlev, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета

С.Ф. Яцун¹ ✉, Х.Х.М. Аль Манджи¹, А.А. Постольный¹, А.С. Яцун¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В статье приведено описание реабилитационного робототехнического комплекса EXOLITE-REHAB, позволяющего осуществлять реабилитационные упражнения нижних конечностей пациентов путем выполнения подъема ноги, вертикализации, приседаний и прочих видов движения. Во многих странах ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении опорно-двигательного аппарата. Поэтому целью данной статьи является изучение и задание основных закономерностей и алгоритмов на основе математических моделей, описывающих управляемое движение экзоскелета нижних конечностей на примере моделирования движения голеностопного шарнира экзоскелета.

Методы. Ключевой особенностью комплекса является применение копирующей системы управления, которая позволяет обеспечить заданное движение голеностопного сустава человека с высокой степенью точности в широком диапазоне изменения параметров. Применяются методы математического моделирования движения голеностопного сустава с учетом последующего возможного их применения на моделировании движения звеньев экзоскелета.

Результаты. Для моделирования работы робототехнического комплекса применяется кинематическое задание траектории движения голеностопного шарнира. Для нахождения вектора обобщенных координат решается обратная задача кинематики с применением векторно-матричного метода с применением матрицы Якоби. Результаты численного моделирования показывают высокую сходимость и адекватность предложенного метода.

Заключение. В статье рассмотрен метод применения копирующей системы управления, обладающей достаточной степенью точности копирования траектории. Результаты моделирования копирующей системы управления реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAB, работающей по разработанному алгоритму, показывают, что она в достаточной степени точности способна повторять требуемую траекторию. В будущем планируется более углубленно исследовать систему на трёхмерной модели с электроприводами.

Ключевые слова: паттерны походки; экзоскелет нижних конечностей; кинематическая модель; датчик силы; голеностопный шарнир.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00773А.

© Яцун С.Ф., Аль Манджи Х.Х.М., Постольный А.А., Яцун А.С., 2019

Для цитирования: Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета / С.Ф. Яцун, Х.Х.М. Аль Манджи, А.А. Постольный, А.С. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 176-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.

Поступила в редакцию 13.06.2019

Подписана в печать 22.07.2019

Опубликована 23.12.2019

Modeling Gait Patterns of a Patient with Orthopedic Injury Using an Exoskeleton

Sergey F. Yatsun¹ ✉, Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood¹,
Alexey A. Postol'nyy¹, Andrey S. Yatsun¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The paper describes the EXOLITE-REHAB rehabilitation robotic complex which makes it possible to do rehabilitation exercises of lower limbs of patients by performing leg lifting, verticalization, squats and other types of movement. In many countries, research work is underway to create devices that allow a person to move in space when the musculo-skeletal system is damaged. Therefore, the purpose of this article is to study and set the basic regularities and algorithms based on mathematical models describing the controlled movement of the lower limbs exoskeleton by the example of modeling the movement of the exoskeleton's ankle joint.

Methods. The key feature of the complex is the use of a follower-up control system that allows us to provide a prescribed movement of the human ankle joint with a high degree of accuracy in a wide range of parameters' changes. Methods of mathematical modeling of the ankle joint movement are applied, taking into account their subsequent possible use in modeling the movement of exoskeleton links.

Results. A kinematic setting of the ankle joint movement trajectory is used in order to simulate the operation of a robotic system. In order to find the vector of generalized coordinates, the inverse kinematics problem is solved using the vector-matrix method with the application of Jacobian matrix. The results of numerical simulation show high convergence and adequacy of the proposed method.

Conclusion. The article considers the method of using a follower-up control system that has a sufficient degree of accuracy of copying the trajectory. The results of modeling the follower-up control system of the EXOLITE-REHAB rehabilitation exoskeleton, working according to the developed algorithm, show that it is able to repeat the required trajectory with sufficient accuracy. In the future, we plan to study the system more deeply on a three-dimensional model with electric drives.

Keywords: gait patterns; lower limb exoskeleton; kinematic model; force sensor; ankle joint.

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

Funding: Research work was supported by RFBR grant 18-08-00773A.

For citation: Yatsun S. F., Al' Mandzhi K. H. M., Postol'nyy A.A., Yatsun A. S. Modeling Gait Patterns of a Patient with Orthopedic Injury Using an Exoskeleton // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 176-188 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 23.12.2019

Введение

В мире сегодня насчитываются десятки миллионов больных с повреждениями опорно-двигательного аппарата. В ряде случаев применение реабилитационных мероприятий с помощью специальных тренажеров [1-7] позволяет восстановить функцию ходьбы пациента, однако так происходит далеко не всегда. Один из способов, позволяющих вернуть пациента к активной жизни, основан на применении индивидуальных экзоскелетов нижних конечностей, позволяющих пациенту осуществлять сложные виды движения, такие как подъем ноги, вертикализация, приседания, ходьба и другие [8-11].

Во многих странах ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении опорно-двигательного аппарата. В Юго-Западном государственном университете (г. Курск) разработан экзоскелет нижних конечностей, обеспечивающий комфортные условия передвижения пациентов с повреждением опорно-двигательного аппарата, а также позволяющий выполнять различные упражнения для реабилитации пациентов [12, 13]. Кроме того, экзоскелет для выполнения реабилитационных мероприятий позволяет контролировать силы, действующие на мышечную систему человека со стороны аппарата, чтобы исключить возможные травмы, возникающие при наличии

у пациента спастики и контрактуры. Для этого экзоскелет оснащен датчиками, измеряющими силы, возникающие при взаимодействии человека и экзоскелета.

Материалы и методы

1. Расчётная схема

Рассмотрим моделирование процесса подъема ноги, одного из важнейших упражнений, выполняемых при реабилитации нижних конечностей. Для этого предлагается использовать EXOLITE-REHAB [14-17], общий вид которого приведен на рис.1. Экзоскелет EXOLITE состоит из стоп 1,7; голеней 2,6; бедер 3,5; спины 4, которые связаны между собой активными шарнирами. Пациент закрепляется в экзоскелете с помощью манжет. На этапе подготовки к ходьбе необходимо отработать все виды движения, сопутствующие ходьбе, поэтому врач-реабилитолог выбирает один из режимов реабилитационных упражнений. Например, подъем ноги на заданную высоту, удержание на заданной высоте стопы и далее опускание ноги в исходную точку. Для описания этого упражнения рассмотрим движение точки А, принадлежащей голеностопному суставу пациента (ГСС), а точка В, задающая движение ноги, принадлежит, соответственно, голеностопному шарниру экзоскелета (ГСШ).

Расчётная схема модели ноги пациента в экзоскелете показана на рис. 2.

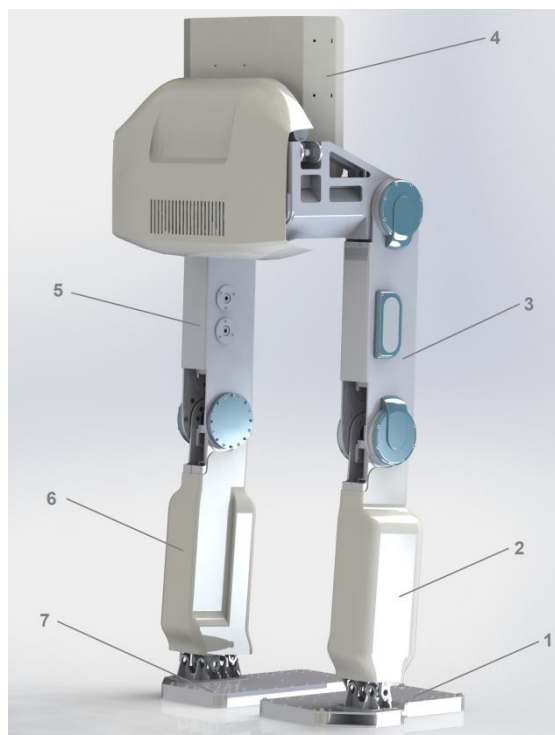


Рис.1. Общий вид реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAB

Fig. 1. General view of the rehabilitation exoskeleton EXOLITE-REHAB

Здесь приняты следующие обозначения: $\vec{r}_B$ – радиус-вектор точки В голеностопного шарнира экзоскелета; $\vec{r}_A$ – радиус-вектор точки А, определяющий положение голеностопного сустава пациента, P – сила, возникающая между человеком и экзоскелетом в области голеностопного сустава; 1 – стопа экзоскелета; 2 – голень экзоскелета; 3 – бедро экзоскелета; 4 – тазобедренный сустав; 8 – датчик, измеряющий силу взаимодействия между пациентом и экзоскелетом в области голеностопного сустава; 9 – бедро пациента; 10 – голень пациента; 11 – стопа пациента; q_1 – абсолютный угол поворота бедра и q_2 – угол поворота голени относительно бедра. Важно, что угол $q_2 > 0$. В

случае, когда $q_2 = 0$ имеет место особое положение рассматриваемой системы, поэтому далее этот режим не рассматривается. B_1, B_2 – точки, определяющие начало и конец траектории движения точки В.

2. Кинематическая модель ноги пациента

Положение точки А в системе координат XOY положение точки А можно определить с помощью координат $\vec{r}_A = (X_A, Y_A)^T$, которые определим по формулам:

$$\begin{cases} X_A = X_0 + L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) + L_2 \cdot \sin q_1 \\ Y_A = Y_0 - L_1 \cdot \cos(q_1) - L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2), \end{cases} \quad (1)$$

где X_0, Y_0 – положение тазобедренного сустава в выбранной системе координат.

3. Задание траектории движения голеностопного шарнира экзоскелета (ГШЭ)

Для задания положения точки В, определяющей положение голеностопного шарнира экзоскелета (ГШЭ), удобно использовать локальные координатные системы, соответственно, для правой стопы $B_2H_2l_2$ и для левой – $B_6H_6l_6$. Радиус-векторы, определяющие положение точек A_i в локальных координатных системах, имеют вид

$$\vec{r}_{BiAi} = [l_i, 0, h_i]^T. \quad (2)$$

Функции $l_i = l_i(t)$, $h_i = h_i(t)$ можно представить в следующем виде:

$$l_i = \sum_{i=0}^n a_i t^i; \quad h_i = \sum_{i=0}^n b_i t^i. \quad (3)$$

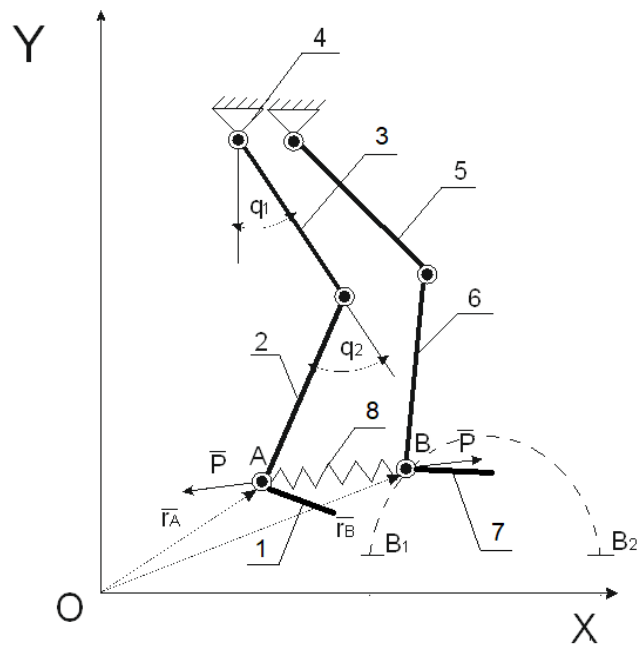


Рис. 2. Расчётная схема ноги пациента в экзоскелете

Fig. 2. The design diagram of the patient's leg in the exoskeleton

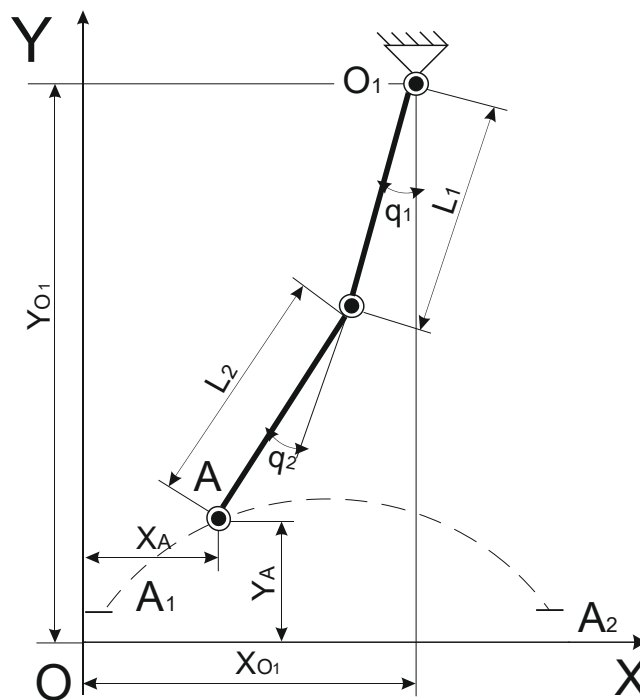


Рис. 3. Кинематическая модель ноги пациента

Fig. 3. Kinematic model of the patient's leg

Траектория движения $h_i = h_i(l_i)$ может быть определена из (4).

Радиус-векторы, определяющие положение точек B_i

$$\bar{r}_{OBi} = [x_{Bi}, y_{Bi}, 0]^T. \quad (4)$$

На рис. 4 показан пример траектории движения точки B . Рассматриваемая траектория состоит из трех участков.

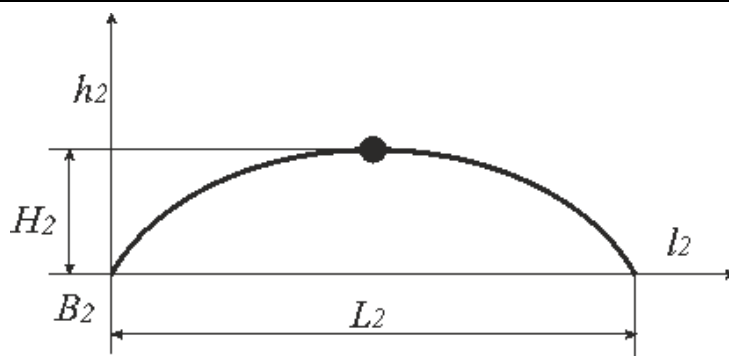


Рис. 4. Траектории движения стоп при движении с отрывом от опорной поверхности

Fig. 4. Trajectories of the feet when moving with a margin from the supporting surface

На первом происходит подъем стопы, на втором – стопа устанавливается на заданной высоте, на третьем участке происходит опускание стопы с условием, что в точке контакта с опорной поверхностью скорость будет равна нулю. Будем считать, что H_2 – высота подъема голеностопного шарнира; L_2 – длина шага. На значения этих параметров накладываются ограничения $H_2 < H_2^m$; $L_2 < L_2^m$, определяемые предельными значениями углов в соответствующих шарнирах. Уравнения движения голеностопа представим в виде:

$$l_2(t) = v_2 \cdot t, \quad (5)$$

$$h_2(t) = 4 \frac{H_2}{L_2} \cdot v_2 \cdot t - 4 \frac{H_2}{L_2^2} \cdot v_2^2 \cdot t^2, \quad (6)$$

что соответствует траектории стопы (см. рис.4).

$$h_2 = a_2 + b_2 \cdot l_2 + c_2 \cdot l_2^2. \quad (7)$$

Для нахождения постоянных в уравнении (7) запишем граничные условия в виде:

$$\text{Если } h_2 = 0, \text{ то } l_2 = 0 \quad (8)$$

$$l_2 = L_2. \quad (9)$$

$$h_2 = H, \text{ то } l_2 = \frac{L_2}{2}. \quad (10)$$

Подставляя (8), (9), (10) в (3), получим:

$$\begin{cases} H_2 = a_2 + b_2 \cdot \frac{L_2}{2} + c_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \\ 0 = a_2 \\ 0 = a_2 + b_2 \cdot L_2 + c_2 \cdot L_2^2. \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Отсюда: } c_2 = -\frac{4H}{L_2^2}; \quad b_2 = \frac{4H}{L_2}.$$

Уравнение траектории движения стопы при отрыве от опорной поверхности имеет вид

$$h_2 = 4 \frac{H_2}{L_2} \cdot l_2 - 4 \frac{H_2}{L_2^2} \cdot l_2^2. \quad (12)$$

Предположим, что стопа (например, правая) движется равномерно, тогда $l_2 = v_2 t$, а высота подъема стопы изменяется по закону

$$h_2 = 4 \frac{H_2}{L_2} v_2 t - 4 \frac{H_2}{L_2^2} v_2^2 t^2. \quad (13)$$

Если выполняется упражнение ходьба на месте, то в этом случае $v_2 = 0$ и движение голеностопа происходит только в вертикальном направлении по координате $h_2(t)$. Для определения положения

ноги пациента, будем искать вектор обобщенных координат $\bar{q} = (q_1, q_2)^T$, задающий движение звеньев, соответствующих заданному положению центра масс экзоскелета и стоп в каждый момент времени.

4. Определение положения ноги пациента

Для нахождения $\bar{q} = (q_1, q_2)^T$ необходимо решить обратную задачу кинематики (ОЗК) [1, 18, 19, 20]. Определяем начальные условия для точек A и B .

$$J(q) = \begin{bmatrix} L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) + L_1 \cdot \cos(q_1) & L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) \\ L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) + L_1 \cdot \sin(q_1) & L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix};$$

$$J(q)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{5 \cdot \sin(q_1 + q_2)}{(2 \cdot \sin(q_2))} & \frac{-5 \cdot \cos(q_1 + q_2)}{(2 \cdot \sin(q_2))} \\ \frac{5 \cdot \sin(q_1 + q_2) + 5 \cdot \sin(q_1)}{2 \cdot \sin(q_2)} & \frac{5 \cdot \cos(q_1 + q_2) + 5 \cdot \cos(q_1)}{2 \cdot \sin(q_2)} \end{bmatrix}.$$

Расчёт компонентов вектора силы P производится по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_X &= C \cdot (X_B - X_A), \\ P_Y &= C \cdot (Y_B - Y_A), \end{aligned} \quad (15)$$

где $X_B; Y_B$ – координаты вектора r_B ; $X_A; Y_A$ – координаты вектора r_A ; C – жёсткость пружины по координатам X и Y соответственно.

Тогда вектор силы P находится следующим образом:

$$P = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2}. \quad (16)$$

Затем происходит расчёт $\cos(\gamma)$ и $\sin(\gamma)$, где γ – угол между голенью и пружиной.

Задаем движение точки B с помощью уравнений (5), (6).

Уравнение для решения ОЗК имеет следующий вид:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + \alpha_k J^{-1} \Delta \bar{\Phi}(t), \quad (14)$$

где $\Delta \bar{\Phi}(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}(t)$

на временном шаге Δt , где $J(q) = \frac{\partial \bar{r}_A}{\partial \bar{q}}$ –

матрица Якоби, $\bar{\Phi}(t) = [l_i(t), y_i(t), h_i(t)]^T$, где $i=2$ или 6.

Ниже представлена прямая и обратная матрицы Якоби:

Расчёт этих значений проводится по следующим формулам:

$$\cos(\gamma) = \frac{P_Y}{\sqrt{P_X^2 + P_Y^2}}, \quad \sin(\gamma) = \frac{P_X}{\sqrt{P_X^2 + P_Y^2}}, \quad (17)$$

где $\cos(\gamma)$ – косинус угла между голенью и пружиной, $\sin(\gamma)$ – синус угла между голенью и пружиной.

Расчёт компонентов вектора r_A производится следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} X_{A_i} = X_{A_{i-1}} + (k_p \cdot P) \cdot \Delta t \cdot \sin(\gamma), \\ Y_{A_i} = Y_{A_{i-1}} + (k_p \cdot P) \cdot \Delta t \cdot \cos(\gamma), \end{cases} \quad (18)$$

где X_{A_i} – координата точки A по оси X , Y_{A_i} – координата точки A по оси Y , $X_{A_{i-1}}, Y_{A_{i-1}}$ – предыдущие значения координат точки A ; k_p – регулировочный коэффициент; P – сила, Δt – временной шаг; γ – угол между пружиной и голенью.

Результаты и их обсуждение

Моделирование проводилось со следующими входными параметрами:

$C = 1000$ Н/м – коэффициент жёсткости пружины; $k_p = 0.2$ – коэффициент; Начальные и конечные скорости

прохождения траектории = 0; $\Delta t = 0.01$ с – шаг времени. В результате работы алгоритма механизм повторил заданную траекторию с достаточной точностью (рис. 5).

График изменения силы P представлен на рис. 6.

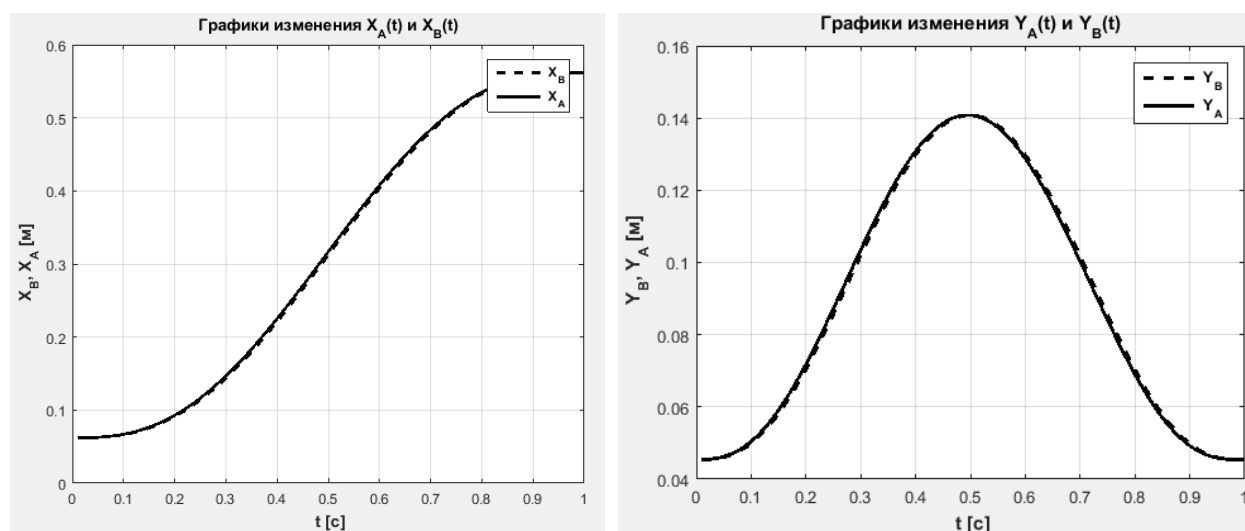


Рис. 5. Сравнение заданной траектории с полученной (x_A – заданная, x_B – полученная)

Fig. 5. Comparison of a given trajectory with the resulting one (x_A – given, x_B – received)

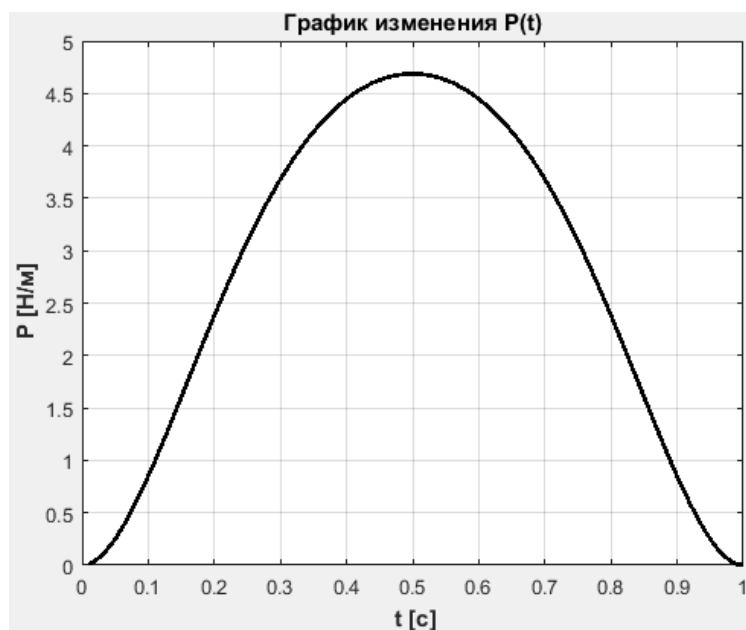


Рис. 6. График изменения силы P в зависимости от времени

Fig. 6. Chart of P force change depending on time

Выводы

Результаты моделирования копирующей системы управления реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAB, работающей по разработанному алго-

ритму, показывают, что она в достаточной степени точности способна повторять требуемую траекторию. В будущем планируется более углубленно исследовать систему на трёхмерной модели с электроприводами.

Список литературы

1. Алисейчик А.П. [и др.] Механика и управление экзоскелетами нижних конечностей для нейрореабилитации спинальных больных // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов. Казань, 2015. Р. 132-134.
2. Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция / А.П. Алисейчик, И.А. Орлов, Е.Ю. Колесниченко, В.Е. Павловский, В.В. Павловский, А.К. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 17(10). С. 670-677.
3. Борисов А. В., Розенблат Г. М., Чигарев А. В. Применение матричного метода и рекуррентного алгоритма к модели плоского многозвенного механизма со звеньями переменной длины, движущегося по горизонтальной плоскости // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник / пред. редкол. А. В. Чигарев. Минск, 2018. Вып. 33. С. 370-380 .
4. Борисов А.В. Механика пространственной модели экзоскелета и антропоморфного робота // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 3-4. С. 46-55.
5. Гаврилов С. В., Занг Д. Т. Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // АЭЭ Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. Пермь, 2016.
6. Домрачев Т.Б., Яшметков К.С., Лоскутов Ю.В. Кинематика локомоций человека при вставании из седа и посадке на опору // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2017. № 1. С. 40-42.
7. Лавровский Э.К. Об энергетике походки человека-оператора, осуществляемых при помощи аппарата “пассивный” экзоскелетон // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2015. № 1. С. 9-24.
8. Contreras-Vidal, Jose L., and Robert G. Grossman. "NeuroRex: A clinical neural interface roadmap for EEG-based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton." Engineering in medicine and biology society (EMBC), 2013 35th annual international conference of the IEEE. IEEE, 2013.

9. Kiguchi Kazuo, Takakazu Tanaka, and Toshio Fukuda. "Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 12.4, 2004. P. 481-490.
10. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *The International Journal of Robotics Research*. 2006, May 1. no. 25. P.561-573.
11. Kazerooni H., Racine JL., Huang L., Steger R. On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *In Robotics and automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE international conference*. 2005. Apr 18. P. 4353-4360. IEEE.
12. Steger R, Kim SH, Kazerooni H. Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *In Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference*. 2006, May 15. P. 3469-3476. IEEE.
13. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, A. Malchikov // *In Advances in Robot Design and Intelligent Control*. 2016, P. 165-172. Springer International Publishing.
14. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, R. Turlapov // *In Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium*. 2015. Dec 8. P. 1-6. IEEE.
15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction // *ANS Conference Series: Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin (Nonholonomic Mechanics, Vortex Structures and Hydrodynamics) Book of Abstracts*. 2019. P. 207-209.
16. Jatsun S.F., Yatsun A.S. Criterion of the rehabilitation process effectiveness on the basis of biomechatronic system EXOLITE REHAB // *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO Cep. 2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO 2018*". 2019. P. 105-110.
17. Structure Design and Dynamic Model Analysis of Multi-degree-of-freedom Exoskeleton / W. Yang, Y. Yang, W. Liu, R. Wang // *In 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15)*. Atlantis Press, 2015.
18. Yatsun A., Jatsun S. Modeling quasi-static gait of a person wearing lower limb exoskeleton *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. № 9783319956299. P. 565-575.
19. Zoss A.B., Kazerooni H., Chu A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, №11(2). P.128-138.
20. NEUROExos: A powered elbow exoskeleton for physical rehabilitation / Vitiello N., T. Lenzi, S. Roccella, S. M.M. De Rossi, E. Cattin, F. Giovacchini, F. Vecchi, M. Carrozza. // *Robotics, IEEE Transactions on* 29. 2013. № 1. P. 220-235.

References

1. Aliseychik A.P. i dr. Mekhanika i upravleniye ekzoskeletami nizhnikh konechnostey dlya neyroeabelitatsii spinal'nykh bol'nykh [Mechanics and control of exoskeletons of the lower extremities for neurorehabilitation of spinal patients]. *XI Vserossiyskiy s'yezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki. Sbornik dokladov* [XI All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Collection of reports]. Kazan, 2015, pp. 132-134 (In Russ.).
2. Aliseychik A.P., Orlov I.A., Kolesnichenko Ye.Yu., Pavlovskiy V.Ye., Pavlovskiy V.V., Platonov A.K. Reabilitatsionnyy ekzoskelet BioMekh: modeli, upravleniye, konstruktsiya. [Rehabilitation exoskeleton BioMech: models, management, design, experiments]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Management*, 2016, no. 17(10), pp. 670-677 (In Russ.).
3. Borisov A. V., Rozenblat G. M., Chigarev A. V. Primeneniye matrichnogo metoda i rekurrentnogo algoritma k modeli ploskogo mnogozvennogo mekhanizma so zven'yami peremennoy dliny, dvizhushchegosya po gorizontallyy ploskosti [Application of the matrix method and the recurrent algorithm to the model of a plane-multipurpose mechanism with lines of variable length moving on a horizontal plane]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika. Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theoretical and applied mechanics. International scientific and technical collection]. Minsk, 2018, vol. 33, pp. 370-380 (In Russ.).
4. Borisov A.V. Mekhanika prostranstvennoy modeli ekzoskeleta i antropomorfnoy robota [The mechanics of the spatial model of the exoskeleton and anthropomorphic robot]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu = Questions of defense technology. Series 16: Technological Tools for Combating Terrorism*, 2018. no. 3-4, pp. 46-55 (In Russ.).
5. Domrachev T.B. Yashmetkov K.S. Loskutov Yu.V. Kinematika lokomotsiy cheloveka pri vstavanii iz seda i posadke na oporu [Kinematics of human locomotion when standing up from a gray-haired vehicle and landing on a support]. *AEE Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike* [AEE Automation in the electric power industry and electrical engineering]. Perm'. Apr. 2016. (In Russ.).
6. Gavrilov S. V., Zang D. T. Komp'yuternoye modelirovaniye dinamiki dvizheniya pyatistepennogo shagayushchego robota [Computer simulation of the dynamics of motion of a five-step walking robot]. *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoy ekonomiki Rossii = Engineering staff - the future of Russia's innovative economy*, 2017, no. 1, pp. 40-42 (In Russ.).
7. Lavrovskiy E.K. Ob energetike pokhodki cheloveka-operatora, osushchestvlyayemoy pri pomoshchi apparata “passivnyy” ekzoskelet [On the energy of the gait of a human operator, carried out using the apparatus “passive” exoskeleton]. *Izvestiya Rossiyskoy akade-*

mii nauk. *Mekhanika tverdogo tela* = *News of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics*, 2015, no. 1, pp. 9-24 (In Russ.).

8. Contreras-Vidal, Jose L., Robert G. Grossman. "NeuroRex: A clinical neural interface roadmap for EEG-based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton." *Engineering in medicine and biology society (EMBC), 2013 35th annual international conference of the IEEE*. IEEE, 2013.

9. Kiguchi Kazuo, Takakazu Tanaka, and Toshio Fukuda. "Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 12.4, 2004, pp. 481-490.

10. Kazerooni H, Steger R, Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*. 2006, May 1, no. 25(5-6), pp.561-73.

11. Kazerooni H., Racine JL., Huang L., Steger R. On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). In *Robotics and automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE international conference*, 2005, Apr 18, pp. 4353-4360. IEEE.

12. Steger R., Kim SH, Kazerooni H. Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on* 2006 May 15, pp. 3469-3476. IEEE.

13. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Malchikov A. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position. In *Advances in Robot Design and Intelligent Control*, 2016, pp. 165-172. Springer International Publishing.

14. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium on* 2015 Dec 8, pp. 1-6. IEEE.

15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction В книге: *ANS Conference Series: Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin (Nonholonomic Mechanics, Vortex Structures and Hydrodynamics)* Book of Abstracts, 2019, pp. 207-209.

16. Jatsun S.F., Yatsun A.S. Criterion of the rehabilitation process effectiveness on the basis of biomechatronic system EXOLITE REHAB В сборнике: *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO Sep. 2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO 2018*", 2019, pp. 105-110.

17. Yang W. Structure Design and Dynamic Model Analysis of Multi-degree-of-freedom Exoskeleton / W. Yang, Y. Yang, W. Liu, R. Wang. In *2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15)*. Atlantis Press Publ., 2015.

18. Yatsun A., Jatsun S. Modeling quasi-static gait of a person wearing lower limb exoskeleton Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019, № 9783319956299, pp. 565-575.
19. Zoss A.B., Kazerooni H. , Chu A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 2006, no. 11(2), pp.128-138.
20. Vitiello N., Lenzi T., Roccella S., . De Rossi S. M.M, Cattin E., Giovacchini F., Vecchi F., Carrozza M. NEUROExos: A powered elbow exoskeleton for physical rehabilitation. *Robotics, IEEE Transactions on* 29, 2013, no. 1, pp.220-235.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergei F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Аль Манджи Халиль Хамед Мохаммед, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Постольный Алексей Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Alexey A. Postolny, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

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

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-189-209>

Программное обеспечение рационального выбора адаптивных технологий возделывания зерновых культур как элемент цифровизации земледелия

А.В. Гостев ¹, А.И. Пыхтин ² ✉, Н.И. Любицкий ²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии – структурное подразделение ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр»
ул. Карла Маркса, 70б, г. Курск, 305021, Российская Федерация

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

✉ e-mail: aipykhtin@swsu.ru

Резюме

Цель исследования. Разработать научно-обоснованную систему поддержки принятия решений для производителей сельскохозяйственной продукции по выбору адаптивных технологий возделывания зерновых культур в условиях Европейской части России.

Методы. Системный подход, теория проектирования баз данных, математическое моделирование, теория разработки программно-информационных систем, методы квалитетрии программных средств.

Результаты. В работе последовательно рассмотрены вопросы необходимости цифровизации земледелия, описаны результаты проводимых в настоящее время исследований по данной тематике, обозначены направления дальнейших исследований таких разработок, на примере собственных исследований поэтапно описан процесс создания и апробации прикладного программного обеспечения. В результате проведенных исследований был создан и апробирован готовый продукт – компьютерная программа, которая решает не только проблему повышения рентабельности производства зерновых культур, но и обеспечения природоохранной направленности используемых технологий, что крайне важно и актуально в настоящее время. Предлагаемый программный комплекс состоит из клиент-серверного приложения для персональных компьютеров, Web-приложения, мобильного приложения для смартфонов на базе операционной системы Android, двух баз данных (для персональных компьютеров и для Онлайн-версии приложения).

Заключение. Создано программное обеспечение, позволяющее подобрать с учетом сложившихся почвенно-климатических условий конкретной территории технологию возделывания выбранной зерновой культуры и, тем самым, способствовать повышению рентабельности производства зерновых культур, обеспечить природоохранную направленность применяемых технологий за счет эффективного использования минеральных удобрений, горючего и химических средств защиты растений, подбора оптимального сорта или гибрида зерновой культуры, используемой сельскохозяйственной техники с учетом требований импортозамещения и предварительного расчета экономической эффективности предлагаемой к внедрению агротехнологии.

Ключевые слова: программное обеспечение; поддержка принятия решений; база данных; цифровое земледелие.

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

© Гостев А.В., Пыхтин А.И., Любицкий Н.И., 2019

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук №МК-1064.2018.11.

Для цитирования: Гостев А.В., Пыхтин А.И., Любичский Н.И. Программное обеспечение рационального выбора адаптивных технологий возделывания зерновых культур как элемент цифровизации земледелия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 189-209. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-189-209>.

Поступила в редакцию 14.10.2019

Подписана в печать 22.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Software of Rational Choice of Adaptive Technologies for the Cultivation of Grain Crops as an Element of Agriculture Digitalization

Andrey V. Gostev¹, Alexey I. Pykhtin²✉, Nikita I. Lyubitskiy²

¹ "Kursk FANTS" all-Russian research Institute of agriculture and soil protection from erosion
70B Karl Marks str., Kursk 305021, Russian Federation

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

✉ e-mail: aipykhtin@swsu.ru

Abstract

Purpose of research. The goal of research is to develop a science-based decision support system for agricultural producers to choose adaptive technologies for growing crops in the European part of Russia.

Methods. System approach, database design theory, mathematical modeling, software and information systems development theory, software qualimetry methods.

Results. The paper consistently addresses the issues of the need to digitalize agriculture, describes the results of current research on this topic, identifies areas for further research of such developments, and describes the process of creating and testing application software in stages on the example of our own research. As a result of the conducted research, a finished product has been created and tested. It is a computer program that solves not only the problem of increasing the profitability of grain production, but also ensures the environmental orientation of the technologies used, which is extremely important and relevant at the present time. The proposed software package consists of a client-server application for personal computers, a web application, a mobile application for smartphones based on the Android operating system, and two databases (for personal computers and for the online version of the application).

Conclusion. There has been created software that allows us to select the technology for cultivating the given grain crop, taking into account the prevailing soil and climatic conditions of a particular territory, and, thus, it can help to increase the profitability of grain production, ensure the environmental orientation of the applied technologies by effectively using mineral fertilizers, fuel and chemical plant protection products and select the optimal variety or hybrid of grain crops. It can also help to choose agricultural machinery, taking into account the requirements of import substitution and preliminary calculation of the economic efficiency of the proposed agricultural technology.

Keywords: software; decision support; database; digital agriculture.

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 work was carried out within the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science No. MK-1064.2018.11.

For citation: Gostev A. V., Pykhtin A. I., Lyubitskiy N. I. Software of Rational Choice of Adaptive Technologies for the Cultivation of Grain Crops as an Element of Agriculture Digitalization. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 189-209 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-189-209>.

Received 14.10.2019

Accepted 22.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

В связи с активным развитием информационных технологий, цифровизация производственных процессов играет определяющую роль в конкурентоспособности и распределении лидирующих позиций среди развитых стран. Именно поэтому в настоящее время тематика становления цифровой экономики затрагивает практически все сферы деятельности.

Российская Федерация не является исключением в данном глобальном тренде. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р утверждена Госпрограмма «Цифровая экономика Российской Федерации», где указано: «...данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности, что повышает конкурентоспособность страны, качество жизни граждан, обеспечивает экономический рост и национальный суверенитет». Тем не менее, согласно опубликованным в данной Программе сведениям, по готовности к использованию экономических и инновационных результатов в цифровых технологиях Россия «занимает 38-е место с большим отставанием от стран-лидеров, таких, как Финляндия,

Швейцария, Швеция, Израиль, Сингапур, Нидерланды, Соединенные Штаты Америки, Норвегия, Люксембург и Германия».

Таким образом, при наличии 120 млн га пашни и являясь крупнейшим экспортером зерна, Россия существенно отстает и занимает только 15-е место по уровню цифровизации сельского хозяйства. В частности, согласно данным Министерства сельского хозяйства РФ, только в 10 % агрохозяйств России применяются решения на основе цифрового земледелия, тогда как в США эта цифра достигает 60 %, в странах Евросоюза еще выше – 80 % [1].

Поэтому переход нашей страны к цифровой экономике рассматривается в качестве ключевой движущей силы экономического роста и улучшения экономического состояния государства. Так, по оценке Минсельхоза России «использование цифровых технологий в АПК позволяет повысить рентабельность сельхозпроизводства за счет точечной оптимизации затрат и более эффективного распределения средств. Внедрение цифровой экономики позволяет снизить расходы не менее чем на 23% при внедрении комплексного подхода».

Мировая практика и опыт успешных отечественных сельскохозяйствен-

ных производителей показывают, что применение современных цифровых технологий уже на текущем этапе позволяет сформировать оптимальные почвенно-агротехнические и организационно-территориальные условия, обеспечивающие в течение всего жизненного цикла сельскохозяйственной продукции значительное повышение урожайности и производительности труда, снижение материальных затрат на ГСМ, электроэнергию, средства защиты растений, оплату труда и другие виды расходов, сохранение плодородия почв и защиту окружающей среды [2].

Современные исследователи видят цифровые технологии в ближайшем будущем неотъемлемой частью аграрного сектора: от систем поддержки принятия решений планирования посевов до автоматизации поливов, цифрового моделирования и прогнозирования урожайности [3].

Основными аргументами в поддержку цифровизации сельскохозяйственного производства являются необходимости решения следующих проблемных задач, связанных с отставанием России от передовых стран мира [4]:

- увеличение количества и качества урожая;
- минимизация вложений капитала;
- снижение трудоемкости и повышение производительности сельскохозяйственного производства;
- уменьшение вредного воздействия на окружающую среду;

– снижение зависимости от человеческого фактора в сельском хозяйстве и девиации по урожайности.

Следует также отметить, что сельское хозяйство представляет собой динамичную систему, подверженную влиянию множества факторов, поэтому для эффективного возделывания сельскохозяйственных культур в течение вегетационного сезона необходимо принимать более 40 различных организационных и управленческих решений, касающихся выбора сортов и гибридов, вида, дозы и способа внесения удобрений, целесообразности проведения основной обработки почвы, нормы высева семян, проведения мероприятий по защите посевов и уборке. От корректности принятого решения зависит величина возможных потерь урожая как в количественном, так и качественном отношении. Поэтому для снижения вероятных потерь урожая следует применять научно-обоснованные решения, основанные на анализе имеющихся условий. Применительно к цифровизации земледелия подобные решения должны быть выражены в максимальной автоматизации основных агротехнологических приемов.

В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [5], утвержденной Указом Президента РФ от 1.12.2016 №642, применительно к сельскохозяйственной отрасли следует выделить 2 ключевых вызова:

- «а) исчерпание возможностей экономического роста России, основанного

на экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов, на фоне формирования цифровой экономики и появления ограниченной группы стран-лидеров, обладающих новыми производственными технологиями» [5];

«г) потребность в обеспечении продовольственной безопасности и продовольственной независимости России, конкурентоспособности отечественной продукции на мировых рынках продовольствия, снижение технологических рисков в агропромышленном комплексе» [5].

Исходя из данных вызовов, в ближайшие 10-15 лет приоритетами научно-технологического развития Российской Федерации предлагается считать:

«а) переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям» [5];

«г) переход к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству, разработку и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений» [5].

В рамках решения данных приоритетных задач вектор направленности современных научных исследований и разработок переместился в область систематизации и накопления информации, анализа разнородных данных, создания новых и адаптации имеющихся математических моделей и автоматизированного или автоматического принятия решений на их основе. Этой тематике посвящены текущие исследования

как российских (В.К. Каличкин (Сибирский ФНЦ агробиотехнологий), В.В. Якушев (АФИ), Е.В. Луценко (Кубанский ГАУ), Л.В. Тиранова (Новгородский НИИСХ), В.М. Буре (СПбГУ)), так и зарубежных ведущих ученых Deepak Keshwani (Гос. университет Северной Каролины, США), Dennis Commarano (Кембридж, Англия) и мн. др. [6-11]. Тем не менее программного обеспечения, позволяющего на основе анализа имеющихся почвенно-климатических и материальных ресурсов формировать в автоматизированном режиме агротехнологии, до 2019 года в Федеральном институте промышленной собственности зарегистрировано не было. Семейство похожих программных продуктов разработано департаментом первичной промышленности и регионального развития правительства Западной Австралии (Department of Primary Industries and Regional Development - Government of Western Australia) - MyCrop Wheat, MyCrop Barley и др. В то же время указанные программы по сути являются справочниками по некоторым сортам зерновых культур с указанием их описания, возможных вредителей и т.д. Элементы поддержки принятия решений в указанных программах отсутствуют.

Материалы и методы

Цель проводимых исследований – разработать научно-обоснованную систему поддержки принятия решений для производителей сельскохозяйст-

венной продукции по выбору адаптивных технологий возделывания зерновых культур в условиях Европейской части России, позволяющую подобрать с учетом сложившихся почвенно-климатических условий конкретной территории технологию возделывания выбранной зерновой культуры и, тем самым, способствовать повышению рентабельности производства зерновых культур, обеспечить природоохранную направленность применяемых технологий за счет эффективного использования минеральных удобрений, горючего и химических средств защиты растений, подбора оптимального сорта или гибрида зерновой культуры, используемой сельскохозяйственной техники с учетом требований импортозамещения и предварительного расчета экономической эффективности предлагаемой к внедрению агротехнологии.

Исследование проводилось с точки зрения системного подхода, теории проектирования баз данных, математического моделирования, теории разработки программно-информационных систем, методов квалиметрии программных средств.

Согласно результатам Всероссийской сельскохозяйственной переписи, для Европейской части России ведущими культурами являются: пшеница (27,8 млн га), ячмень (8,4 млн га), овес (3,0 млн га), кукуруза на зерно (2,9 млн га), рожь (1,3 млн га), гречиха (1,2 млн га), горох (1,1 млн га), просо (0,4 млн га) [12]. С учетом контрастных почвенно-

климатических и ландшафтных условий изучаемой территории, анализ и обобщение результатов многолетних и краткосрочных полевых опытов по разработке и оптимизации технологий или отдельных приемов возделывания зерновых культур проводился дифференцировано для каждого укрупненного региона Европейской части России (Северного, Северо-Западного, Центрального, Волго-Вятского, Центрально-Черноземного, Северо-Кавказского, Средневолжского и Нижневолжского).

Для оптимизации процесса рационального выбора высокорентабельных адаптивных технологий было принято решение о поэтапном достижении поставленной цели за счет разработки и последующей интеграции в единой платформе вспомогательных приложений, обеспечивающих научно-обоснованный подбор основных агротехнологических приемов при возделывании ведущих зерновых культур на основе анализа имеющихся условий и их соответствия нормативным значениям массивов информации второго уровня:

- по выбору сортов и гибридов зерновых культур;
- по выбору систем удобрения, обработки почвы, защиты растений;
- по выбору способов посева и уборки, в т.ч. сельскохозяйственной техники.

Проведенная работа по анализу экспериментальных данных, полученных при ведении многолетних полевых опытов в Курском федеральном аграр-

ном научном центре и обобщении результатов исследований научно-исследовательских и образовательных учреждений, а также практических результатов других сельскохозяйственных предприятий Европейской части Российской Федерации, позволила выявить наиболее эффективные условия применения адаптивных технологий возделывания ведущих зерновых культур различного уровня интенсивности, на основе которых впоследствии были разработаны нормативно-справочная база данных, математическая модель и алгоритм выбора адаптивных технологий возделывания ведущих зерновых культур. Алгоритм подбора адаптивных агротехнологий основан на последовательном преодолении ключевых факторов почвенно-климатической и агротехнологической направленности, лимитирующих получение наиболее рентабельной урожайности культуры с высокими качественными показателями при соблюдении принципов ресурсосбережения.

Алгоритм подбора агротехнологий представляет собой дерево принятия решений, в котором «листья» – составляющие агротехнологии, содержащие формулы и (или) алгоритмы расчета значений параметров, а «ветки» – соответствующие направления определения элементов агротехнологии, зависящие от значения выбранных или рассчитанных параметров. Совокупность «веток» дерева принятия решений от корневого до замыкающего узла представляет собой адаптивную агротехнологию. Неко-

торые «листья» соответствуют несовместимым вариантам агротехнологий (например, возделывание зерновой культуры в nereкомендованном регионе), выбор такого «листа» требует возврата к предыдущему узлу дерева и не является возможным решением.



Рис. 1. Фрагмент дерева принятия решений

Fig. 1. The fragment of decision tree

Для определения элементов агротехнологии используются следующие инструменты:

1. Матрицы совместимости различных значений параметров элементов агротехнологии, построенные по результатам обработки экспертных оценок. Например, совместимость зерновых культур $C = \bigcup_i c_i$ ($i = \overline{1, N_C}$) и возможных предшественников $P = \bigcup_j p_j$ ($j = \overline{1, N_P}$) задается матрицей $S = (s_{ij})$,

каждый элемент которой равен $s_{ij} = 1$, если возделывание зерновой культуры рекомендуется для выбранного предшественника, $s_{ij} = 0$ - если не рекомендуется. Аналогичные матрицы заданы для соответствия регионов и культур, целесообразных и рекомендованных (предварительных и итоговых) способов основной обработки почвы, способов обработки почвы и групп почвообрабатывающих орудий и т.д.

2. Таблично заданные функции рекомендованных значений. Например, для всех совместимых комбинаций культур $c_i \in C$, типа почвы $t_k \in T$, региона возделывания $r_m \in R$ указаны рекомендованные дозы внесения макроудобрений $u(c_i, t_k, r_m)$.

3. Общеизвестные формулы для расчета элементов агротехнологии. Например, расчет убыли органического вещества почвы производится по следующей формуле:

$$V = G \cdot H \cdot D \cdot kk \cdot km, \quad (1)$$

где V – количество минерализованного гумуса, т/га;

G – содержание гумуса в почве, %;

H – глубина пахотного слоя, см;

D – плотность почвы, г/см³;

kk – относительный индекс биологической продуктивности;

km – коэффициент минерализации гумуса.

4. Метод взвешенной суммы критериев для определения субоптимального решения многокритериальной задачи оптимизации [14, 17]. Например, для

определения агротехнологии на основе выбранной культуры c_i и рассчитанных значений параметров агротехнологии $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{N_p})$:

• вычисляются значения:

$$F_i(c_i, \vec{x}) = \left(\sum_{il} w_{il} \cdot fa_l(c_i, x_{il}) \right) \cdot \left(\prod_{il} ft_l(c_i, x_{il}) \right), \quad (2)$$

где w_{il} – вес критерия по показателю x_{il} ;

$fa_l(c_i, x_{il})$ – функция оценки соответствия параметра агротехнологии для выбранной культуры;

$ft_l(c_i, x_{il})$ – функция совместимости значения параметра агротехнологии для выбранной культуры;

• находится максимальное значение

$$S = \max_i \{F_i(c_i, \vec{x})\};$$

• если значение S соответствует нескольким агротехнологиям с погрешностью ε , задаваемой администратором системы, т.е. $|S - F_i(c_i, \vec{x})| \leq \varepsilon$ для двух и более значений k , то выбирается экономически эффективная агротехнология [18].

В процессе адаптации агротехнологий к сложившимся природно-климатическим особенностям ландшафта, необходимо четко дифференцировать каждый агротехнологический прием по целесообразности его применения к текущим условиям с учетом знаний об истории ведения полей и его текущем состоянии. С учетом данного положения, научно-обоснованный подбор наиболее рациональной системы удобрений под возделываемую культуру в разработанном нами алгоритме представляет собой многоступенчатый процесс подбора

органических и минеральных удобрений, а также мелиорантов на основе анализа текущих почвенно-климатических и агротехнологических условий (содержания доступных для растений элементов питания в почве, реакции почвенной среды, гранулометрического состава почвы, климатических условий, биологических особенностей сельскохозяйственных культур, последующего воздействия удобрений, рельефа полей и многих других) с использованием расчетного метода элементного баланса [15] исходя из запаса питательных веществ в почве и хозяйственного выноса элементов питания сельскохозяйственными культурами. Подбор наиболее оптимального способа основной обработки почвы [16] ведется также на основе анализа почвенно-климатических и агротехнологических условий (с учетом гранулометрического состава почв, значений плотности почвы, способа почвообработки под предшествующую культуру, вероятности протекания эрозионных процессов, засоренности полей и т.д.). Таким образом, с помощью разработанного алгоритма формируются ключевые агротехнологические приемы – внесение удобрений и мелиорантов, а также основная обработка почвы, на которые впоследствии накладываются такие агроприемы, как протравливание семян, посев, мероприятия по защите растений и уборка.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время в Реестр селекционных достижений, допущенных к

возделыванию на территории Российской Федерации [13], включено более 3000 различных сортов и гибридов зерновых культур, подбор которых представляется довольно трудной задачей даже для агрономов-экспертов. Поэтому решение о возделывании конкретного сорта или гибрида, как правило, носит субъективный характер, основанный на общих рекомендациях научно-исследовательских учреждений для регионов, успешных маркетинговых акциях семеноводческих компаний, опыта применения сортов или гибридов в соседних агрофирмах, либо консервативного мнения руководителей сельскохозяйственных организаций. Поэтому, современное высокотехнологичное аграрное производство требует разработки и применения методов, алгоритмов и программных средств для подбора сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, учитывающих агротехнологические и почвенно-климатические особенности агросистемы.

Процесс сортосмены, связанный с изменением погодных, климатических, экологических, экономических и других условий является довольно частым явлением в сельском хозяйстве и поэтому с достоверной вероятностью существует потребность сельхозтоваропроизводителей в разработке подобного программного обеспечения. На первом этапе заявленных исследований была разработана «Программа для научно-обоснованного выбора сортов и гибридов зерновых культур» [14] в виде кли-

ент-серверного приложения для персональных компьютеров, реализованного на технологической платформе «1С: Предприятие 8.3», Web-приложения, мобильного приложения для смартфонов на базе операционной системы Android «Зерновые культуры: подбор сортов и гибридов», двух баз данных (для персональных компьютеров и для Онлайн-версии приложения) (рис. 2-3). На 21-ой Российской агропромышленной выставке «Золотая осень 2019» данный программный комплекс был награжден серебряной медалью и дипломом.

Web-сайт находится в открытом доступе (<http://выборсорта.рф>), мобильное приложение размещено в каталоге Google Play Market. Доступ к приложению бесплатен. Административная часть, реализованная на платформе «1С: Предприятие 8.3», находится в закрытом доступе, позволяет редактировать

обрабатываемый перечень зерновых культур, их сортов и гибридов, их характеристик, показателей для подбора и т.д. Административный модуль позволяет импортировать данные из форматов Microsoft Excel и Word, выполняет автоматизированную передачу данных на Web-сервер для корректной работы и обновления Онлайн-приложения и приложения для Android.

Последовательность подбора сортов и гибридов сельскохозяйственных культур представлена интуитивно-понятным пользовательским интерфейсом и заключается в проведении всего двух этапов (рис. 3):

1) в рабочем режиме авторизованный пользователь выбирает интересующую его сельскохозяйственную культуру;

2) для выбранной культуры указывает планируемый регион возделывания и значения необходимых пользователю целевых показателей.

урта.рф/home/cropLevel

Админ Культуры Сорта Параметры Уровни параметров Параметры культур Уровни культур Устойчивость Пользователь Javid

Уровни культур

Добавить

Название культуры	Название параметра	Название уровня	Действие
Горох посевной	Засухоустойчивость	Выше стандартов	Редактировать
Горох посевной	Засухоустойчивость	На уровне стандартов	Редактировать
Горох посевной	Засухоустойчивость	Не имеет значения	Редактировать
Горох посевной	Засухоустойчивость	Ниже стандартов	Редактировать
Горох посевной	Период созревания	Не имеет значения	Редактировать
Горох посевной	Период созревания	Позднеспелый	Редактировать
Горох посевной	Период созревания	Среднепоздний	Редактировать

Рис. 2. Web-интерфейс программного обеспечения по научно-обоснованному выбору сортов и гибридов зерновых культур

Fig. 2. Web-based software interface for scientifically grounded selection of varieties and hybrids of grain crops

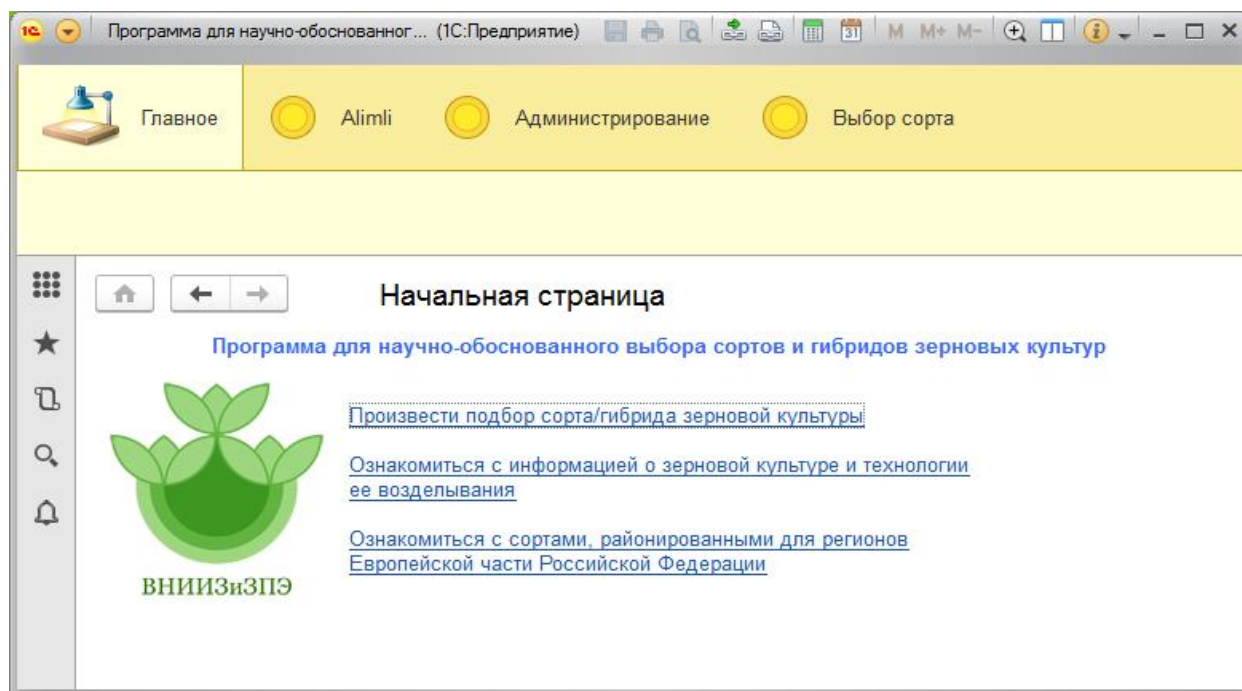


Рис. 3. Клиентский интерфейс программного обеспечения по научно-обоснованному выбору сортов и гибридов зерновых культур, реализованных на технологической платформе «1С: Предприятие 8.3»

Fig. 3. Client interface of the software for scientifically-based selection of varieties and hybrids of grain crops implemented on the technological platform "1C: Enterprise 8.3"

На основе указанных значений показателей и выбранного региона Российской Федерации пользователь получает список рекомендуемых сортов (гибридов), соответствующих, либо в допустимых пределах (задаваемых администратором системы) частично соответствующих введенному запросу с возможностью дальнейшего ознакомления с их подробным описанием.

Проведенная работа по разработке алгоритма рационального подбора высокорентабельных адаптивных технологий возделывания зерновых культур позволила перейти к заключительному этапу исследования – созданию приложения «Программа для рационального выбора высокорентабельных адаптивных технологий возделывания зерновых культур для различных условий Европейской части Российской Федерации»,

позволяющего сельхозтоваропроизводителям на основе компьютерного анализа имеющихся данных оперативно и обоснованно, с научной точки зрения, использовать почвенно-климатические и агротехнологические ресурсы сельскохозяйственных территорий с целью повышения рентабельности применяемых агротехнологий, а также обеспечения природоохранной направленности используемых технологий за счет эффективного использования минеральных удобрений, горючего и химических средств защиты растений, подбора оптимального сорта или гибрида зерновых культур, используемой сельскохозяйственной техники с учетом требований импортозамещения и предварительного расчета экономической эффективности выбранной технологии (рис. 4).

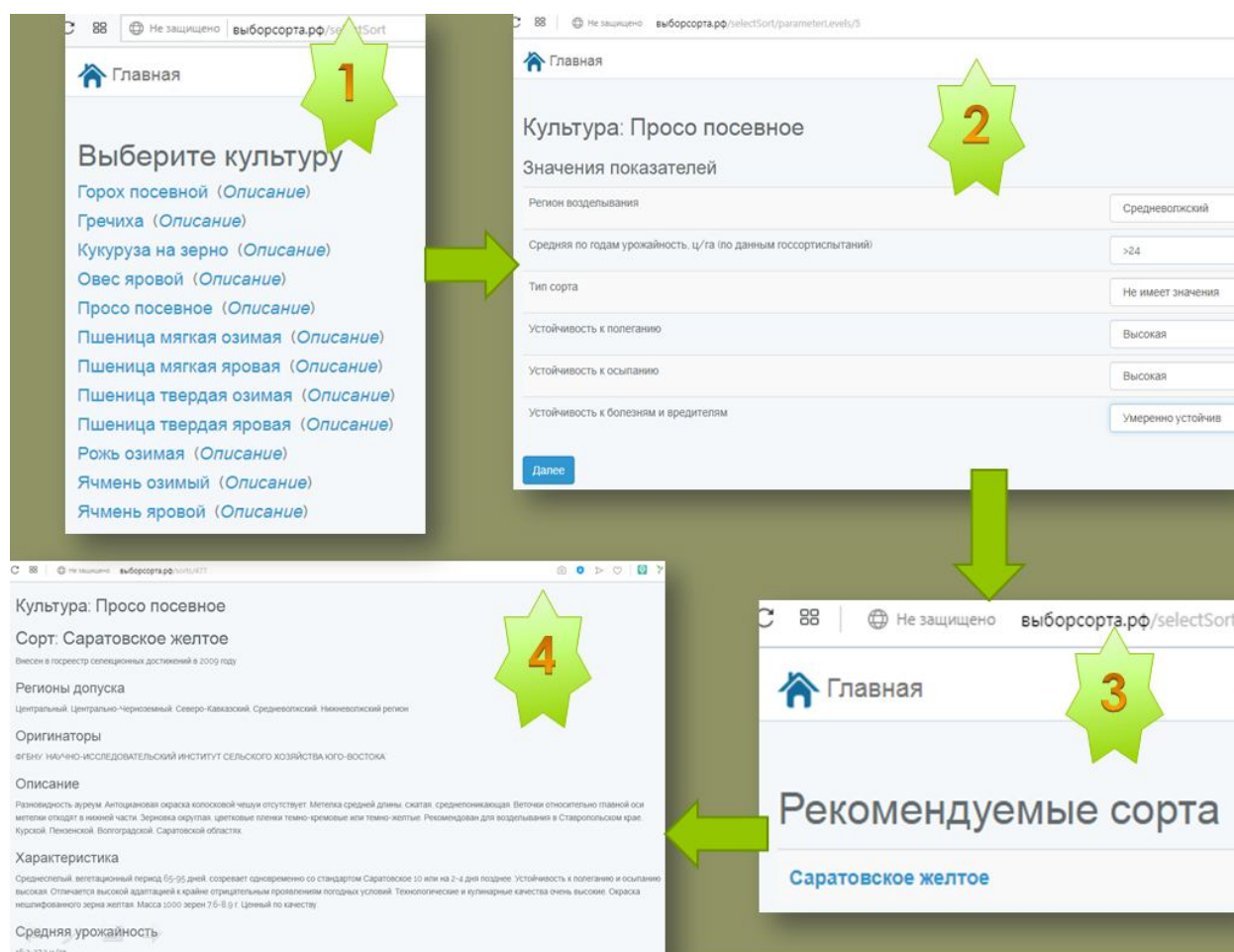


Рис. 4. Последовательность подбора сортов и гибридов сельскохозяйственных культур с помощью программы (на примере проса посевного)

Fig. 4. Sequence of selection of varieties and hybrids of agricultural crops with the help of the program (on the example of common millet)

Последовательность подбора высококорентабельных адаптивных технологий возделывания ведущих зерновых культур представлена в табл. 1 и представляет собой сочетание рабочего режима пользователя (в котором пользователь вводит данные, описывающие почвенно-климатические и агротехнологические условия рабочего участка) и режима поддержки принятия решений (в котором происходит анализ введенных пользователем данных, с учетом имеющихся нормативов, и производит-

ся расчет доз и сроков внесения удобрений, мелиорантов и средств защиты растений). Программа разработана с использованием NoSQL базы данных MongoDB.

Прототип программного комплекса доступен в настоящее время по адресу в сети Интернет - <https://agro.workspark.ru/> (рис. 5).

Аналогичные программные комплексы, которые в полном объеме решают подобные задачи, в настоящее время отсутствуют.

Таблица 1. Основные этапы рационального подбора высокорентабельных адаптивных технологий возделывания зерновых культур**Table 1.** Main stages of rational selection of highly profitable adaptive technologies of grain crops cultivation

Рабочий режим пользователя	Режим поддержки принятия решений
Выбор планируемой к возделыванию сельскохозяйственной культуры с указанием региона возделывания	Определение возможности возделывания выбранной культуры в выбранном регионе: если выбранная культура соответствует выбранному региону, то выбор технологии идет дальше, если не соответствует, то пользователю предлагается скорректировать либо выбор культуры, либо выбор региона
Уточнение предшественника выбранной культуры	Определение целесообразности возделывания культуры по данному предшественнику: если выбранную культуру целесообразно возделывать по указанному предшественнику, то выбор технологии идет дальше, если не целесообразно, то пользователю предлагается скорректировать выбор культуры
Заполнение характеристики пахотного слоя почвы рабочего участка (тип почвы, гранулометрический состав, содержание гумуса в почве, %; глубина пахотного слоя, см; плотность почвы, г/см ³ ; значение кислотности почвы, наличие эрозийных процессов)	Определение целесообразности внесения удобрений (органических и макроудобрений), а также мелиорантов, рекомендации по необходимым дозам и срокам внесения (с использованием расчетного метода элементного баланса), по наиболее рациональному способу основной обработки почвы и нормам высева семян
Заполнение фитосанитарной характеристики рабочего участка (способ обработки под предшественник, сорняки, болезни и вредители, численно превышающие экономический порог вредности)	Определение целесообразности применения средств защиты растений, рекомендации по необходимым дозам и срокам внесения
Заполнение климатической характеристики рабочего участка в период, предшествующий уборке	Определение наиболее целесообразного способа уборки возделываемой культуры (включая возможность десикации посевов)

В качестве аналогов использования разработанного комплекса приложений является применение следующих методов: неавтоматизированный анализ электронной версии Государственного реестра селекционных достижений, допущенных к использованию на территории России; анализ с привлечением экспертов-агрономов; анализ информа-

ции соответствующих научно-практических семинаров Министерства сельского хозяйства России и подведомственных организаций; анализ на основе рекомендаций, разработанных профильными научно-исследовательскими организациями. Частичным аналогом являются разработки Департамента первичной промышленности и региональ-

ного развития правительства Западной Австралии – программы для операционной системы Android «MyCrop Wheat», «MyCrop Barley» и др.

В то же время указанные программы несут в большей степени справочный и информационный характер, не содержат инструментов для автоматизи-

зированной поддержки принятия решений. Сопоставление разработанного программного комплекса с используемыми для достижения аналогичных результатов методами рационального подбора высокорентабельных адаптивных технологий возделывания зерновых культур представлено в табл. 2.

Пожалуйста, выберите планируемую к возделыванию культуру

Варианты ответа

Горох

Горох

Гречиха

Кукуруза (на зерно)

Овес

Просо

Пшеница (озимая мягкая)

Пшеница (озимая твердая)

Пшеница (яровая мягкая)

Пшеница (яровая твердая)

Рожь озимая

Ячмень (озимый)

Ячмень (яровой)

Введите значения

Содержание гумуса в почве

7

Глубина пахотного слоя

в см

Плотность почвы

в г/см³

Далее

Какие удобрения/мелиоранты планируется вносить?

☒ Органические

доза вносимых удобрений в т/га

☒ Макроудобрения

20

Р в кг.д.в

К в кг.д.в

☒ Мелиоранты

доза вносимых мелиорантов в т/га

Далее

Для восполнения вышеуказанного органического вещества, выберите планируемый источник повышения органического вещества почвы

☒ Пожнивno-корневые остатки

☒ Использование соломы

☒ Сидеральные культуры

Далее

Рис.5. Примеры интерфейсов прототипа программного комплекса

Fig. 5. Examples of software prototype interfaces

В настоящее время разработанное программное обеспечение апробировано в ряде фермерских хозяйств Курской области, получены положительные заключения.

Рассматривается вопрос о коммерциализации программного комплекса как путем платного предоставления доступа к полному функционалу про-

граммы, так и за счет размещения в системе рекламных материалов организаций, занимающихся производством и реализацией оригинальных семян и сельскохозяйственной продукции, в т.ч. удобрений, и (или) техники, а также за счет получения небольшой доли процента с продаж сельскохозяйственной продукции через платформу.

Таблица 2. Сопоставление разработанного программного комплекса с аналогами**Table 2.** Comparison of the developed software complex with analogues

Параметр для сравнения	Разработанное программное обеспечение	Конкуренты				
		Государственный реестр селекционных достижений	Использование экспертной оценки привлечённым специалистом	Посещение семинаров Минсельхоза России и подчиненных организаций	Использование рекомендаций профильных НИИ	Разработка Департамента первичной промышленности и регионального развития правительства Западной Австралии
Возможность ознакомления с описанием элементов агротехнологий	+	+	+/- (как правило, эксперты не знают всех тонкостей, разбираются только в отдельных элементах агротехнологии)	+	+/- (рекомендации обновляются редко)	-/+ (только для избранных культур и сортов)
Возможность выбора оптимальной агротехнологии	+	-	-/+ (как правило, эксперты не знают всех тонкостей, разбираются только в отдельных элементах агротехнологии)	-/+ (только среди агротехнологий, рассматриваемых на семинаре)	-/+ (рекомендации обновляются редко)	-
Возможность дистанционного выбора агротехнологии	+	+(только в части сортов и гибридов)	+/-	-	+	+(только в части сортов и гибридов)
Оценка вероятности получения «предвзятого» результата	низкая	средняя	высокая	средняя	низкая	средняя
Среднее время принятия решения	15 мин	2 часа	2 часа	6 часов	2 часа	15 мин
Наличие адаптированной версии для мобильных устройств	+	-	-	-	-	+

Результаты работы заложенного в программу алгоритма были сопоставлены с результатами, получаемыми с помощью классифицирующих нейронных сетей (многослойных персептронов, обучаемых по алгоритму Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно с различными функциями активации скрытого слоя и слоя выходных нейронов), на вход которых подается вектор рассчитанных значений параметров агротехнологии $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{N_p})$, а на вы-

ходах – признаки рекомендуемых агротехнологий. Обучающая выборка сформирована на основе обобщения «очевидных» вариантов, т.е. вариантов, по которым решение человека-эксперта по выбору агротехнологии однозначно. Объем обучающей выборки составил 6567 вариантов. Сравнение результатов предложенного алгоритма с наиболее точными из полученных нейронных сетей представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение матриц ошибок 5 наиболее точных классифицирующих нейронных сетей и предлагаемого алгоритма

Table 3. Comparison of error matrices of the 5 most accurate classifying neural networks and the proposed algorithm

Алгоритм	Показатель	Агротехнология 1	Агротехнология 2	Агротехнология 3	Все вместе
Многослойный персептрон 752-7-3 Алгоритм обучения BFGS-122	Все	2217,000	2811,000	1539,000	6567,000
	Правильно	1807,000	2654,000	1138,000	5599,000
	Неправильно	410,000	157,000	401,000	968,000
	Правильно (%)	81,507	94,415	73,944	85,260
	Неправильно (%)	18,493	5,585	26,056	14,740
Многослойный персептрон 752-9-3 Алгоритм обучения BFGS-148	Все	2217,000	2811,000	1539,000	6567,000
	Правильно	1954,000	2592,000	1286,000	5832,000
	Неправильно	263,000	219,000	253,000	735,000
	Правильно (%)	88,137	92,209	83,561	88,808
	Неправильно (%)	11,863	7,791	16,439	11,192
Многослойный персептрон 752-9-3 Алгоритм обучения BFGS-163	Все	2217,000	2811,000	1539,000	6567,000
	Правильно	1598,000	2590,000	1055,000	5243,000
	Неправильно	619,000	221,000	484,000	1324,000
	Правильно (%)	72,079	92,138	68,551	79,839
	Неправильно (%)	27,921	7,862	31,449	20,161
Многослойный персептрон 752-7-3 Алгоритм обучения BFGS-126	Все	2217,000	2811,000	1539,000	6567,000
	Правильно	1919,000	2588,000	1177,000	5684,000
	Неправильно	298,000	223,000	362,000	883,000
	Правильно (%)	86,558	92,067	76,478	86,554
	Неправильно (%)	13,442	7,933	23,522	13,446
Многослойный персептрон 752-10-3 Алгоритм обучения BFGS-91	Все	2217,000	2811,000	1539,000	6567,000
	Правильно	1838,000	2630,000	1188,000	5656,000
	Неправильно	379,000	181,000	351,000	911,000
	Правильно (%)	82,905	93,561	77,193	86,128
	Неправильно (%)	17,095	6,439	22,807	13,872
Разработанное программное обеспечение	Все	2217,000	2811,000	1539,000	6567,000
	Правильно	1984,000	2711,000	1297,000	5992,000
	Неправильно	233,000	100,000	242,000	575,000
	Правильно (%)	89,490	96,443	84,276	270,208
	Неправильно (%)	10,510	3,557	15,724	29,792

Предложенный алгоритм демонстрирует в среднем на 5% (по трем агротехнологиям) более высокую точность, чем модели на нейронных сетях. Преимущество алгоритма обусловлено применением функций совместимости значения параметра агротехнологии для выбранной культуры, которые отсеивают непригодные варианты классификации.

Следующими этапами развития программного комплекса станут:

- Совершенствование функционала личного кабинета пользователя.
- Внедрение системы прямого заказа сельскохозяйственной продукции.
- Перевод приложения на другие языки (как стран СНГ, так и других государств), наполнение базы данных соответствующими зарубежными культурами и сортами (гибридами).

Выводы

«Программа для рационального выбора высокорентабельных адаптивных технологий возделывания зерновых культур для различных условий Европейской части Российской Федерации» позволяет специалистам сельскохозяйственных предприятий, фермерских хозяйств, экспертами обучающимся вузов и сузов сельскохозяйственного направления на основе диалоговых запросов в автоматизированной форме как удален-

но, так и в режиме Online в кратчайшие сроки ознакомиться с перечнем сортов/гибридов ведущих колосовых, крупяных и зернобобовых культур (на текущий момент база данных включает более 600 наименований), допущенных к возделыванию на территории Европейской части Российской Федерации, произвести научно-обоснованный подбор сортов/гибридов зерновых культур по заданным параметрам, а также сформировать адаптивные технологии (либо отдельно ведущие агроприемы) их возделывания на основе анализа соответствия имеющихся почвенно-климатических и агротехнических условий сельскохозяйственных территорий нормативно-справочным данным. Использование базы данных сельскохозяйственных машин, орудий и агрегатов отечественного и импортного производства (более 240 наименований) поможет сформировать технологическую карту, а также позволит экономически и энергетически оценить эффективность данного мероприятия. В программе предусмотрена корректировка нормативной базы данных с возможностью ее модификации не только применительно к условиям Европейской части России, но и для других регионов РФ, а также ближнего и дальнего зарубежья без существенных изменений программного кода.

Список литературы

1. Цифровизация сельского хозяйства. URL: http://polit.ru/article/2018/02/21/sk_digital_farming/ (дата обращения: 11.05.2018).
2. Цифровая трансформация сельского хозяйства России: офиц. изд. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 80 с.
3. Щербина Т.А. Цифровая трансформация сельского хозяйства РФ: опыт и перспективы // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. М., 2019. Вып. 14. С. 450-453.
4. Цифровизация сельскохозяйственного производства России на период 2018-2025 гг. // Исследование кооперационного проекта «Германо-Российский аграрно-политический диалог». Москва/Берлин, 2018. 33с.
5. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. М., 2016. 39 с.
6. Якушев В.В., Якушев В.П. Перспективы «умного сельского хозяйства» в России // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88, № 9. С. 773–784.
7. Степных Н.В., Заргарян А.М., Жукова О.А. Компьютерная программа по проектированию технологий выращивания сельхозкультур // Аграрный вестник Урала. 2017. № 3 (157). С.54–58.
8. Исакова С.П., Лапченко Е.А. Web-комплекс на базе математической модели формирования оптимального машинно-тракторного парка // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2016. № 5 (252). С. 76–82.
9. An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models / R. Anderson, D. Keshwani, A. Guru etc. // Enviromental modeling and Software. 2018. Vol. 108. P. 40–50.
10. Dzotsi K.A., Basso B., Jones J.W. Development, uncertainty and sensitivity analysis of the simple SALUS crop model in DSSAT // Ecological Modelling. 2013. No. 260. P. 62–76.
11. Lopez-Requelme J., Pavon-Pulido N., Navarro-Hellin H. A software architecture based on FIWARE cloud for precision agriculture // Agricultural water management. 2017. T. 183. С. 123–135.
12. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года: в 8 т. / Федеральная служба гос. статистики. М.: ИИЦ «Статистика России», 2018. Т. 1. 458 с.
13. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т.1. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 504 с.
14. Пыхтин А.И., Гостев А.В., Алимли Д.А. Модель, алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного подбора сортов и гибридов зерновых культур /

// Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 3 (28). С. 25-34.

15. Методические указания по определению баланса питательных веществ: азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: Изд-во ЦИНАО, 2000. 40 с.

16. Пыхтин И.Г., Гостев А.В., Нитченко Л.Б. Теоретические основы систематизации обработок почвы в агротехнологиях нового поколения // Земледелие. 2015. № 5. С. 13-15.

17. Гостев А.В., Пыхтин А.И. Современные подходы к автоматизации рационального выбора адаптивных агротехнологий // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 11. С. 71-74.

References

1. Tsifrovizatsiya sel'skogo khozyaistva [Digitalization of agriculture]. Available at: http://polit.ru/article/2018/02/21/sk_digital_farming/ (accessed 11.05.2018) (In Russ.).

2. *Tsifrovaya transformatsiya sel'skogo khozyaistva Rossii* [Digital transformation of agriculture in Russia]. Moscow, Rosinformagrotech Publ., 2019, 80 p. (In Russ.).

3. Shcherbina T.A. Tsifrovaya transformatsiya sel'skogo khozyaistva RF: opyt i perspektivy [Digital transformation of agriculture of the Russian Federation: experience and prospects]. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya. Ezhegodnik* [Russia: trends and prospects of development. Yearbook]. Moscow, 2019, is. 14, pp. 450-453 (In Russ.).

4. Tsifrovizatsiya sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva Rossii na period 2018-2025gg. [Digitalization of agricultural production in Russia for the period 2018-2025]. *Issledovanie kooperatsionnogo proekta "Germano-Rossiiskii agrarno-politicheskii dialog"* [Study of the cooperation project "German-Russian agrarian-political dialogue"]. Moscow – Berlin, 2018, 33 p. (In Russ.).

5. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii* [Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation]. Moscow, 2016, 39 p. (In Russ.).

6. Yakushev V.V., Yakushev V.P. Perspektivy «umnogo sel'skogo khozyaistva» v Rossii [Prospects of "smart agriculture" in Russia]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 88, no. 9, pp. 773-784 (In Russ.).

7. Steppe N.V., Zargaryan A.M., Zhukova O.A. Komp'yuternaya programma po proektirovaniyu tekhnologii vyrashchivaniya sel'khozkul'tur [A computer program for the design of technologies of cultivation of agricultural crops]. *Agrarnyi vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*, 2017, no. 3 (157), pp. 54-58 (In Russ.).

8. Isakova S.P., Lapchenko E.A. Web-kompleks na baze matematicheskoi modeli formirovaniya optimal'nogo mashinno-traktornogo parka [Web-complex on the basis of mathematical model of optimal machine-tractor park formation]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Bulletin of agricultural science*, 2016, no. 5 (252), pp. 76-82 (In Russ.).

9. Anderson R., Keshwani D., Guru A. An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models. *Environmental modeling and Software*, 2018, vol. 108, pp. 40-50.

10. Dzotsi K.A., Basso B., Jones J.W. Development, uncertainty and sensitivity analysis of the simple SALUS crop model in DSSAT. *Ecological Modelling*, 2013, no. 260, pp. 62-76.

11. Lopez-Requelme, J., Pavon-Pulido N., Navarro-Hellin H. A software architecture based on FIWARE cloud for precision agriculture. *Agricultural water management*, 2017, vol. 183, pp. 123-135.

12. Itogi Vserossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi perepisi 2016 goda [Results of the All-Russian agricultural census of 2016]. Moscow, *IITS "Statistics of Russia" Publ.*, 2018, vol. 1, 458 p. (In Russ.).

13. Gosudarstvennyi reestr selektsionnykh dostizhenii, dopushchennykh k ispol'zovaniyu [State register of breeding achievements approved for use. Vol. "Varieties of plants" (official edition)]. Moscow, *Rosinformagrotech Publ.*, 2019, 504 p. (In Russ.).

14. Pykhtin A.I., Gostev A.V., Alimli D.A. Model', algoritm i programmnoe obespechenie dlya avtomatizirovannogo podbora sortov i gibridov zernovykh kul'tur [Model, algorithm and software for automated selection of varieties and hybrids of grain crops]. *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. 3 (28), pp. 25-34 (In Russ.).

15. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu balansa pitatel'nykh veshchestv: azota, fosfora, kaliya, gumusa, kal'tsiya* [Guidelines for determining the balance of nutrients: nitrogen, phosphorus, potassium, humus, calcium]. Moscow, *TsINA O Publ.*, 2000, 40 p. (In Russ.).

16. Pykhtin I.G., Gostev A.V., Nitchenko L.B. Teoreticheskie osnovy sistematizatsii obrabotok pochvy v agrotekhnologiyakh novogo pokoleniya [Theoretical bases of systematization of soil treatments in agrotechnologies of new generation]. *Zemledelie = Agriculture*, 2015, no. 5, pp. 13-15 (In Russ.).

17. Gostev A.V., Pykhtin A. I. Sovremennye podkhody k avtomatizatsii ratsional'nogo vybora adaptivnykh agrotekhnologii [Modern approaches to automation of rational choice of adaptive agrotechnologies]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of Agriculture*, 2018, vol. 32, no. 11, pp. 71-74 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Гостев Андрей Валерьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института земледелия и защиты почв от эрозии – структурного подразделения ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: gav33@list.ru

Пыхтин Алексей Иванович, кандидат технических наук, директор департамента информационных технологий и нового набора, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aipykhtin@swsu.ru

Любичкий Никита Игоревич, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nlold@ya.ru

Andrey V. Gostev, Cand. of Sci. (Agricultural) Sciences, Leading Researcher of the All-Russian Research Institute of Agriculture and Soil Protection from Erosion - Department of the Kursk Federal Agrarian Research Center, Kursk, Russian Federation
e-mail: gav33@list.ru

Alexey I. Pykhtin, Cand. of Sci. (Engineering), Director of the Department of Information Technology and New Recruitment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aipykhtin@swsu.ru

Nikita I. Lyubitsky, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nlold@ya.ru

Алгоритмы функционирования магнито-метрической системы обеспечения поисково-спасательных операций с применением беспилотных летательных аппаратов

Д.Е. Гуцевич¹, Г.М. Проскуряков¹, В. Н. Слонов², Д.П. Тетерин²,
Е.А. Титенко³ ✉, С.Н. Фролов³, Л.А. Лисицин³

¹ ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина»
ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Российская Федерация

² АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова,
ул. Запольная, 47, г. Курск, 305040, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

Цель исследования – сокращение времени и повышение эффективности поиска и спасения терпящих бедствие экипажей сухопутной техники, воздушных, надводных и подводных судов. Комплексирование физических, информационных и геометрических параметров позволяет достоверно обнаруживать одиночные ферромагнитные тела за счет анализа дополнительной информации в рабочих алгоритмах.

Методы. Статья содержит практически значимый вариант построения поисковой системы, реализуемой на двух и большем числе беспилотных летательных аппаратов, движущихся в районе поиска в согласованном строю на базовой дистанции. Система решения основана на использовании в качестве магнитометрической информации компонент магнитного поля без использования первичной градиентометрической информации. Эта особенность позволяет получить компактные и функционально полные алгоритмы. Вычисления по таким алгоритмам обеспечивают устойчивость беспилотного летательного аппарата в различных сочетаниях курса, крена и тангажа.

Результаты. В статье были построены алгоритмы функционирования магнитометрической системы поиска ферромагнитных тел на основе уравнений магнитостатики. Интеллектуальная система построена по схеме измерительно-вычислительного контура с разнесенными в пространстве векторными трехосными блоками магнитометров. Система способна решать весь комплекс задач поиска, обнаружения, пеленгации, локализации, позиционирования и идентификации металлических предметов, обладающих собственным магнитным полем.

Заключение. Основной результат исследования заключается в том, что рабочие алгоритмы обнаружения ферромагнитных тел комплексно учитывают характеристики воздушной среды, инструментальную погрешность блоков измерений физических величин и геометрические пропорции расположения измерительной аппаратуры на борту беспилотных и пилотируемых поисково-спасательных вертолетов. Полученные результаты исследований использованы при разработке аппаратно-программного комплекса с беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа, предназначенного для обеспечения поисково-спасательных операций в условиях Арктики.

Ключевые слова: магнитометрия; магнитометрический поиск; дистанционная магнитометрическая поисковая система; алгоритмы поиска ферромагнитных тел.

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

Для цитирования: Алгоритмы функционирования магнито-метрической системы обеспечения поисково-спасательных операций с применением беспилотных летательных аппаратов / Д.Е. Гуцевич, Г.М. Проскуряков, В. Н. Слонов, Д.П. Тетерин, Е.А. Титенко, С.Н. Фролов, Л.А. Лисицин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 210-224. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-210-224>.

Поступила в редакцию 31.10.2019

Подписана в печать 18.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Algorithms for Functioning of the Magneto-Metric System to Provide Search and Rescue Operations Using Unmanned Flying Vehicles

Denis E. Gutsevich¹, German M. Proskuryakov¹, Vladimir N. Slonov¹,
Dmitry P. Teterin², Evgeny A. Titenko³, Sergey N. Frolov³, Leonid A. Lisitzin³

¹ Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarina
77 Polytechnic str., Saratov 410054, Russian Federation

² Joint Stock Company "Aviaavtomatika"
47 Zapol'nya str., Kursk 305040, Russian Federation

³ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Reducing the time and increasing the efficiency of search and rescue of crews of land vehicles, air, surface and underwater craft. Combining physical, informational, and geometric parameters allows reliable detection of single ferromagnetic bodies by analyzing additional information in working algorithms.

Methods. The paper contains a practically significant variant of building a search engine that is implemented on two or more unmanned flying vehicles moving in the search area in a coordinated formation at the basic distance. The solution system is based on using magnetic field components as magnetometric information without using primary gradient information. This feature allows us to get compact and functionally complete algorithms. Calculations using such algorithms ensure the stability of an unmanned flying vehicle in various combinations of vector, roll and pitch.

Results. Algorithms for the functioning of the magnetometric system for searching ferromagnetic bodies based on the magnetostatic equations have been constructed in the article. The intelligent system is based on the scheme of a measuring and computing circuit with staggered vector three-axis blocks of magnetometers in space. The system is able to solve the whole range of problems of search, detection, direction finding, localization, positioning and identification of metal objects that have their own magnetic field.

Conclusion. The main result of the study is that the working algorithms for detecting ferromagnetic bodies take into account the characteristics of the air environment, the instrumental error of measurement units of physical quantities and the geometric proportions of measuring equipment location on board the unmanned and manned search and rescue helicopters. The obtained research results have been used in the development of a hardware and software complex with helicopter-type unmanned flying vehicles designed to support search and rescue operations in the Arctic.

Keywords: magnetometry; magnetometric search; remote magnetometric search system; search algorithms for ferromagnetic bodies.

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

For citation: Gutsevich D. E., Proskuryakov G. M., Slonov V. N., Teterin D. P., Titenko E. A., Frolov S. N., Lisitzin L. A. Algorithms for Functioning of the Magneto-Metric System to Provide Search and Rescue Operations Using Unmanned Flying Vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 210-224 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-210-224>.

Received 31.10.2019

Accepted 18.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Научно-техническая задача разработки комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА), робототехнических комплексов, предназначенных для выполнения поисково-спасательных операций, в настоящее время является актуальной, в климатически сложных погодных условиях и высокой степени неопределенности исходных данных [1]. Успешное решение задачи во многом зависит от возможностей бортовых аппаратных и программных средств по обнаружению разнородных металлических предметов на поверхности воды и почвы в условиях отсутствия прямой видимости и при неблагоприятных погодных условиях [2 – 6]. Использование известных методов и средств (ферромагнитные искатели, магнитные пеленгаторы и обнаружители, детекторы и идентификаторы магнитных аномалий и т.д.) поиска и обнаружения ферромагнитных тел (ФМТ) в магнитометрических и градиентометрических каналах измерений обычно не приводит к полным положительным результатам [6 – 11]. Поэтому целью проведенных исследований является разработка алгоритмов магнитометрической системы обеспечения поисково-спасательных операций (МСОПСО).

Алгоритмы МСОПСО предполагается реализовать с помощью программного обеспечения вычислительной части системы, устанавливаемой на беспилотных и пилотируемых поисково-спасательных вертолетах (БПСВ) [12].

Материалы и методы

Схема пространственно-информационного взаимодействия ФМТ и МСОПСО, устанавливаемой на борту БПСВ, представлена на рис. 1. При движении поисковых вертолетов БПСВ-1 и БПСВ-2 по соответствующим траекториям O_1B_1 и O_2B_2 с помощью трехосных блоков магнитометров ТБМ-1 и ТБМ-2, установленных на вертолетах, в МСОПСО формируются две совокупности компонентных магнитограмм, имеющих типовые формы сигнатур (рис. 2). В геометрии и формах магнитограмм $T_{xi}(l)$, $T_{yi}(l)$, $T_{zi}(l)$, $i = \overline{1,2}$, i – порядковый номер БПСВ, отражается полная информация о магнитных свойствах ФМТ, формирующего локальное магнитное поле диполя, его локализации, позиционировании и ориентации относительно поисковых систем координат. Здесь $T_{xi}(l)$, $T_{yi}(l)$, $T_{zi}(l)$ – зависимости проекций векторов $\vec{T}_i$ напряженностей результирующего магнитного поля на оси связанных трехгранников

X_i, Y_i, Z_i БПСВ от удаления l . Аргумент l характеризует удаление блоков ТБМ-1 и ТБМ-2 от соответствующих точек пересечения траекторий O_1B_1 и O_2B_2 полета вертолетов с линиями траверсы – 1, 2 (AC_1 и AC_2). Причем, линии траверс перпендикулярны линиям траекторий БПСВ ($AC_1 \perp O_1B_1$) и ($AC_2 \perp O_2B_2$). Точки и оси симметрии магнитограмм соответствуют моментам прохождения вертолетами БПСВ-1 и БПСВ-2 соответствующих точек C_1 и C_2 на траверсах, характеризуемых наименьшими удалениями их от центра магнитного диполя искомого ФМТ.

С учетом этого рабочие алгоритмы должны обеспечить преобразование первичной магнитометрической информации во вторичную информацию о параметрах позиционирования, ориентации и намагниченности ФМТ.

Показания блоков магнитометров ТБМ-1 и ТБМ-2 в приборных базисах $p_i = X_i Y_i Z_i, i = \overline{1,2}$ формируются в соответствии с уравнениями Пуассона [8, 11]:

$$\bar{T}_i = [T_{x_i} \ T_{y_i} \ T_{z_i}]^T = B_i \cdot M_i \cdot [(S_i + E) \cdot A_i \cdot \bar{T}_{мпз_i} + [P_i \ Q_i \ R_i]^T], \quad (i = \overline{1,2}), \quad (1)$$

где $\bar{T}_i$ – векторы напряженности результирующих магнитных полей, наблюдаемых с помощью ТБМ на i -ых объектах;

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_x^i & -\beta_x^i \\ -\alpha_y^i & 1 & \beta_y^i \\ \beta_z^i & -\alpha_z^i & 1 \end{bmatrix} - \text{матрицы}$$

геометрических погрешностей сборки трехосных блоков магнитометров, акселерометров и гироскопов на i -м объекте;

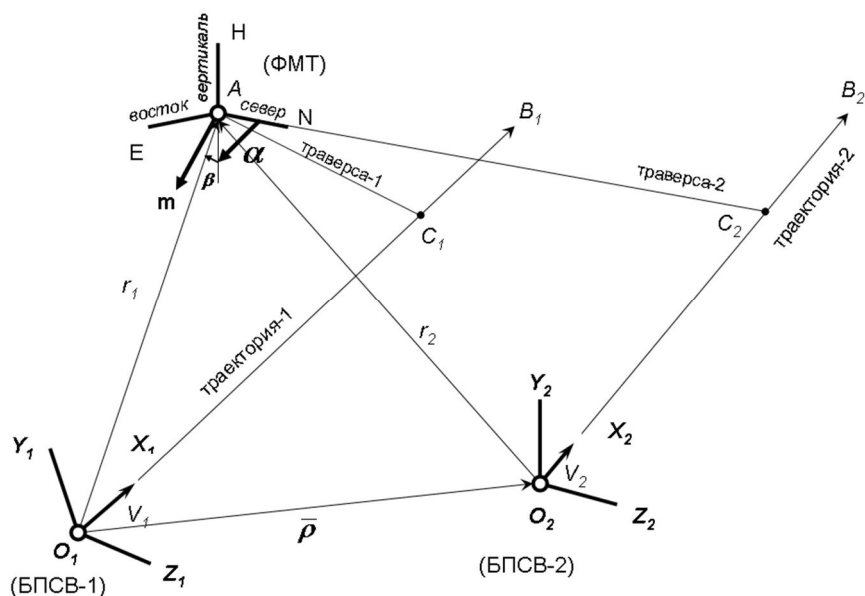


Рис. 1. Схема магнитометрического поиска ферромагнитных тел

Fig. 1. Scheme of magnetometric search for ferromagnetic objects

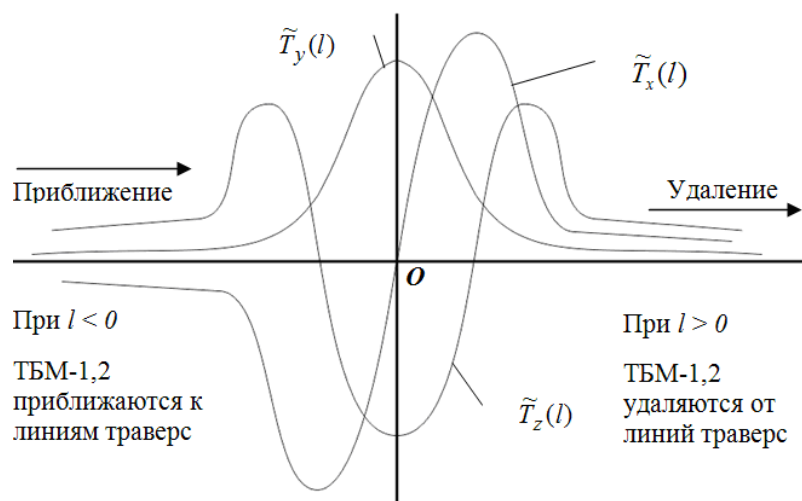


Рис. 2. Типовые графики магнитограмм для дипольного магнитного поля

Fig. 2. Typical graphs of magnetograms for a dipole magnetic field

$\alpha_{xk}^i, \alpha_{yk}^i, \alpha_{zk}^i, \beta_{xk}^i, \beta_{yk}^i, \beta_{zk}^i$ – величины геометрических погрешностей сборки трехосных блоков магнитометров ($k \leftrightarrow м$), акселерометров ($k \leftrightarrow а$) и гироскопов ($k \leftrightarrow г$) в связанных координатных осях X_i, Y_i, Z_i на i -м объекте;

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 & \beta_i & -\alpha_i \\ -\beta_i & 1 & \sigma_i \\ \alpha_i & -\sigma_i & 1 \end{bmatrix} - \text{матрицы}$$

геометрических погрешностей монтажа модулей с трехосными блоками магнитометров, акселерометров и гироскопов на i -м объекте;

$\alpha_i, \beta_i, \sigma_i$ – значения величин геометрических погрешностей монтажа -го модуля, содержащего трехосные блоки магнитометров, акселерометров и гироскопов, на i -м объекте;

$$S_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \\ d_i & e_i & f_i \\ g_i & h_i & k_i \end{bmatrix} - \text{матрицы ко-}$$

эффициентов Пуассона i -го объекта для характеристики индуктивной намагниченности;

$a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, k_i$ – коэффициенты Пуассона;

E – единичная матрица;

A_i – матрицы ориентации в пространстве i -го объекта;

$\bar{T}_{МПЗ_i} = [T_{Ni} \quad T_{Hi} \quad T_{Ei}]^T$ – векторы напряженностей магнитного поля Земли в точках текущего местоположения i -го объекта;

T_{Ni}, T_{Hi}, T_{Ei} – компоненты этих векторов в географическом трехграннике $q = NHE$;

P_i, Q_i, R_i – значения составляющих вектора напряженности магнитного поля i -го объекта в связанных координатных осях X_i, Y_i, Z_i .

В соответствии с уравнением (1) видно, что в модель сигналообразования ТБМ-1 и ТБМ-2 входят различные параметры: технологические (B_i, M_i); объектовые (P_i, Q_i, R_i, S_i); геомагнитные ($\bar{T}_{МПЗ_i}$); эксплуатационные (A_i и навигационные параметры – $\varphi_i, \lambda_i, h_i$, со-

держатся в выражениях для компонент векторов $\bar{T}_{МПЗ_i}$ в соответствии с моделями МПЗ).

Косвенное представление о масштабах магнитного поиска ФМТ и параметрах режимов полета поисковых вертолетов дают данные табл. 1 [4, 9].

Таблица 1. Характеристики локальных магнитных аномалий промышленных источников на показания магнитометров

Table 1. The characteristics of local magnetic anomalies of industrial objects on the readings of magnetometers

Объект	Максимальная дальность влияния ЛМА (м) при пороге чувствительности магнитометров $\Delta B = 0.5 \text{ нТл}$	Предельная дальность влияния ЛМА (м) при пороге чувствительности магнитометров $\Delta B = 0.1 \text{ нТл}$	Предельная дальность влияния ЛМА (м) при пороге чувствительности магнитометров $\Delta B = 0.01 \text{ нТл}$
Судно массой 1000 т	315	540	1200
Легковой автомобиль массой 1 т	27	46	101
Легкий самолет (типа ЯК-12, ЯК-52)	22	30	66
Трубопровод диаметром 150 мм с толщиной стенки 6 мм	30	69	152
Трубопровод диаметром 1600 мм с толщиной стенки 10 мм	90	205	451

С учетом предварительно проведенных технологических (инструментальных и объектовых) калибровок становятся известными параметры матриц B_i, M_i, S_i и векторов напряженности магнитного поля объектов $[P_i \ Q_i \ R_i]^T = \bar{T}_{МПО_i}$, $i = \overline{1, 2}$. Это позволяет в дальнейшем производить на борту поисковых вертолетов операции приведения текущих показаний ТБМ-1 и ТБМ-2 к ортонормированным приборным базисам $p_i = X_i \ Y_i \ Z_i$ с учетом измеренных углов крена ϑ_i и тангажа ϑ_i :

$$\tilde{\bar{T}}_i = [\tilde{T}_{xi} \ \tilde{T}_{yi} \ \tilde{T}_{zi}]^T = A_{\vartheta_i}^T \cdot A_{\gamma_i}^T \cdot (S_i + E)^{-1} (M_i^{-1} \cdot B_i^{-1} \cdot \bar{T}_i - \bar{T}_{МПО_i}) \quad (2)$$

$i = \overline{1, 2}$

где $\tilde{\bar{T}}_i$ – векторы скорректированных показаний ТБМ i -ых объектов с учётом выполнения операций приведения к базисам $X_i \ Y_i \ Z_i$;

$\tilde{T}_{xi}, \tilde{T}_{yi}, \tilde{T}_{zi}$ – компоненты векторов $\tilde{\bar{T}}_i$ в проекциях на оси приборных базисов $p_i = X_i \ Y_i \ Z_i$;

$A_{\vartheta_i}^T, A_{\gamma_i}^T$ – транспонированные матрицы ориентации i -ых объектов по углам тангажа и крена, соответственно.

Графики магнитограмм (рис. 2) соответствуют приведенным показаниям блоков магнитометров $\tilde{T}_i$ к осям ортонормированных базисов.

В материалах существующей литературы выполнение полных операций поиска, обнаружения, локализации, позиционирования и идентификации ФМТ строится на основе математического описания графиков магнитограмм (рис. 2), наблюдаемых на борту носителя [6, 11]. Однако в этом случае алгоритмы МСОПСО получаются громоздкими и склонными к потере устойчивости при определенных условиях. Для исключения этих недостатков в настоящей работе рабочие алгоритмы МСОПСО строятся на основе использования в качестве магнитометрической информации только показаний ТБМ-1 и ТБМ-2 по компонентам магнитного поля без использования первичной градиентометрической информации. Градиентометрическая информация в этом случае формируется на основе первичных компонентных магнитометрических измерений как результат вычислений с учетом измерений базы $\bar{\rho}$ (рис. 1). Магнитограммы (рис. 2) при этом могут быть также использованы в качестве прогнозирующих функций для вероятностного прогнозирования ФМТ.

Оценки параметров реального магнитного поля Земли (МПЗ) $\hat{T}_{МПЗi}$ в текущих точках местоположения поисковых вертолетов БПСВ-1 и БПСВ-2 на траекториях O_1B_1 и O_2B_2 (рис. 1) могут быть выполнены на основе вычисления

проекций $\hat{T}_{Ni}$; $\hat{T}_{Hi}$; $\hat{T}_{Ei}$ вектора $\hat{T}_{МПЗi}$ на оси географического трехгранника $q = NHE$ (N, E – направления на север и восток, H – вертикаль) с учетом использования приведенных показаний блоков $\tilde{T}_i$, $i = \overline{1, 2}$:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{МПЗi} &= [\hat{T}_{Ni} \quad \hat{T}_{Hi} \quad \hat{T}_{Ei}]^T = \\ &= A_{\psi_i}^T \cdot \tilde{T}_i = A_{\psi_i}^T \cdot [\tilde{T}_{xi} \quad \tilde{T}_{yi} \quad \tilde{T}_{zi}]^T \quad (3) \\ &i=1-2. \end{aligned}$$

где A_i^T , $A_{\psi_i}^T$ – транспонированные матрицы ориентации и курса i -го вертолета;

$\hat{T}_{Ni}$, $\hat{T}_{Hi}$, $\hat{T}_{Ei}$ – оценки северной, вертикальной и восточной составляющей МПЗ по показаниям i -го блока магнитометров.

Редуцированные показания блоков ТБМ-1 и ТБМ-2 могут быть вычислены по схемам перекрестного приведения к смежному трехграннику $p_i = X_i Y_i Z_i$ соседнего вертолета:

$$\begin{aligned} \langle \bar{T}_2 \rangle &= [\langle T_{x_2} \rangle \quad \langle T_{y_2} \rangle \quad \langle T_{z_2} \rangle]^T = \\ &A_{\psi_1} \cdot \hat{T}_{МПЗ2}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \langle \bar{T}_1 \rangle &= [\langle T_{x_1} \rangle \quad \langle T_{y_1} \rangle \quad \langle T_{z_1} \rangle]^T = \\ &A_{\psi_2} \cdot \hat{T}_{МПЗ1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\langle \bar{T}_1 \rangle$, $\langle \bar{T}_2 \rangle$ – векторы редуцированных показаний блоков ТБМ-1 и ТБМ-2;

$\langle T_{x_1} \rangle, \langle T_{y_1} \rangle, \langle T_{z_1} \rangle, \langle T_{x_2} \rangle, \langle T_{y_2} \rangle, \langle T_{z_2} \rangle$ – проекции векторов $\langle \bar{T}_1 \rangle$ и $\langle \bar{T}_2 \rangle$ на оси смежных приборных трехгранников $p_i = X_i Y_i Z_i$;

A_{ψ_1}, A_{ψ_2} – ориентации i -го объекта по курсу ψ_i .

По показаниям спутниковых навигационных систем СНС-1 и СНС-2, установленных на БПСВ-1 и БПСВ-2,

соответственно, можно вычислить радиус-вектор $\bar{\rho}$ (дистанцию) положения поисковых вертолетов относительно друг друга (рис. 1).

В качестве условий обнаружения ФМТ по его дипольному магнитному полю с помощью системы разнесенных в пространстве ТБМ-1 и ТБМ-2 могут быть приняты следующие неравенства:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{T}_{ij} &= \left| \tilde{T}_i - A_{\psi_j} \cdot \bar{T}_{МПЗj}^H \right| = \\ &= \left| \begin{bmatrix} \tilde{T}_{xi} & \tilde{T}_{yi} & \tilde{T}_{zi} \end{bmatrix}^T - A_{\psi_j} \cdot \begin{bmatrix} T_{Nj}^H & T_{Hj}^H & T_{Ej}^H \end{bmatrix}^T \right| = \\ &= \left| \begin{bmatrix} \Delta \hat{T}_{xij} & \Delta \hat{T}_{yij} & \Delta \hat{T}_{zij} \end{bmatrix}^T \right| > 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{T}_{ij} &= \left| \tilde{T}_i - \langle \bar{T}_j \rangle \right| = \\ &= \left| \begin{bmatrix} \Delta \hat{T}_{xij} & \Delta \hat{T}_{yij} & \Delta \hat{T}_{zij} \end{bmatrix}^T \right| > 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$i=1-2, j=1-2.$

Вектор нормального магнитного поля Земли (МПЗ) и его компоненты:

$$\bar{T}_{МПЗ}^H = [T_N^H \ T_E^H \ T_H^H]^T \quad (8)$$

вычисляют по модели IGRF (например, WMM, EMM, HDGM).

Проекция радиуса-вектора $\bar{\rho}$ на оси географического трехгранника $q = NHE$ равны (R – радиус Земли):

$$\left. \begin{aligned} \rho_N &= \Delta\varphi \cdot R = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot R, \\ \rho_H &= \Delta h = h_1 - h_2, \\ \rho_E &= \Delta\lambda \cdot R \cdot \cos\varphi_i = (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot R \cdot \cos\varphi_i, \end{aligned} \right\} (9)$$

где $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ – разности широт, долгот и высот для точек местоположения вертолетов, $i=1-2, j=1-2$.

Модуль дистанции между вертолетами представляется выражением:

$$\rho = (\rho_N^2 + \rho_E^2 + \rho_H^2)^{1/2}. \quad (10)$$

Проекция радиуса-вектора $\bar{\rho} = [\rho_N \ \rho_E \ \rho_H]^T$ относительного положения поисковых вертолетов на оси приборных трехгранников $p_i = X_i \ Y_i \ Z_i$ равны:

$$[\rho_{xi} \ \rho_{yi} \ \rho_{zi}]^T = A_{\psi} \cdot [\rho_N \ \rho_E \ \rho_H]^T. \quad (11)$$

С учетом выражения (11) тензор градиентов 1-го порядка, заданный в приборном базисе i -го поискового вертолёта, определяется как квадратная матрица $[G_i]$ (3×3) [8, 9, 11]:

$$\begin{aligned} [G_i] &= \left[\frac{\partial \Delta \bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{xi}} \right] = \\ &= \left[\frac{\partial \Delta \bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{xi}} \ \frac{\partial \Delta \bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{yi}} \ \frac{\partial \Delta \bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{zi}} \right]^T \quad (i=1,2) \\ &\quad (j;k=1,3) \end{aligned} \quad (12)$$

$i=1-2, j,k=1-3$

Причём:

$$[G_i] = \begin{bmatrix} \nabla T_{xx}^i & \nabla T_{xy}^i & \nabla T_{xz}^i \\ \nabla T_{yx}^i & \nabla T_{yy}^i & \nabla T_{yz}^i \\ \nabla T_{zx}^i & \nabla T_{zy}^i & \nabla T_{zz}^i \end{bmatrix} \quad (13)$$

Компонентные градиенты (элементы тензоров $[G_i]$) вычисляют по формулам частных производных [13, 14]: с учетом известных проекций вектора дистанции $\bar{\rho}_i = [\rho_{xi} \ \rho_{yi} \ \rho_{zi}]^T$:

$$\left. \begin{aligned} \nabla T_{xx}^i &= \frac{\Delta T_{xij}}{\rho_{xi}}, \nabla T_{xy}^i = \frac{\Delta T_{xij}}{\rho_{yi}}, \nabla T_{xz}^i = \frac{\Delta T_{xij}}{\rho_{zi}}, \\ \nabla T_{yx}^i &= \frac{\Delta T_{yij}}{\rho_{xi}}, \nabla T_{yy}^i = \frac{\Delta T_{yij}}{\rho_{yi}}, \nabla T_{yz}^i = \frac{\Delta T_{yij}}{\rho_{zi}}, \\ \nabla T_{zx}^i &= \frac{\Delta T_{zij}}{\rho_{xi}}, \nabla T_{zy}^i = \frac{\Delta T_{zij}}{\rho_{yi}}, \nabla T_{zz}^i = \frac{\Delta T_{zij}}{\rho_{zi}}. \end{aligned} \right\} (14)$$

$i=1-2, j=1-2.$

С учетом оценок разностных векторов $\Delta \hat{T}_{ij}; \Delta \bar{T}_{ij}$ по формулам (6) – (8) и градиентов 1-го порядка по формулам (9) – (14) для каждого блока ТБМ можно составить векторно-матричные уравнения [7 – 9, 11]:

$$[G_i] \cdot \bar{r}_i = -3\Delta\hat{T}_{ij} \quad (15)$$

$$\Delta\hat{T}_{ij} = [\Delta\hat{T}_{xij} \ \Delta\hat{T}_{yij} \ \Delta\hat{T}_{zij}]^T = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r_i^5} [R_i] [m_{xi} \ m_{yi} \ m_{zi}]^T \quad (16)$$

$$[R_i] = \begin{bmatrix} 3x_i^2 - r_i^2 & 3x_i y_i & 3x_i z_i \\ 3y_i x_i & 3y_i^2 - r_i^2 & 3y_i z_i \\ 3z_i x_i & 3z_i y_i & 3z_i^2 - r_i^2 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где $[R_i]$ – геометрическая матрица (3×3) $i=1-2, j=2-1$;

$\bar{r}_i$ – радиус-вектор, характеризующий положение искомого ФМТ относительно i -ого поискового вертолета ($i = 1, 2$), (рис. 1), $\bar{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^2 \frac{\text{НТЛ} \cdot \text{м}}{\text{А}}$;

μ – относительная магнитная проницаемость среды (для воздуха и воды $\mu \approx 1$);

$m_{xi}; m_{yi}; m_{zi}$ – проекции вектора магнитного момента $\bar{m}$ ФМТ (диполя) на оси i -го приборного трехгранника $p_i = X_i Y_i Z_i$ (рис. 1).

Из уравнения (15) находим радиус-вектор положения обнаруженного ФМТ относительно i -ого поискового вертолета [8, 9, 11]:

$$\bar{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T = -3[G_i]^{-1} \cdot \Delta\hat{T}_{ij} \quad (18)$$

$i=1-2, j=1-2$.

Решения (18) существуют, если выполняются условия не вырожденности тензора градиентов 1-го порядка:

$$\det[G_i] \neq 0 \quad (19)$$

$i=1-2$.

Условия (19) нарушаются, когда скалярное произведение:

$$\bar{m} \cdot \bar{\rho}_i = 0, \text{ или } \bar{m} \perp \bar{\rho}_i \quad (20)$$

$i=1-2$.

Условие ортогональности векторов (19) выполняется всегда полностью или частично хотя бы для одного поискового вертолета даже в том случае, если выполняется условие ортогональности (20) для другого вертолета (рис. 1).

Пеленг χ_i обнаруженного и локализованного ФМТ, наблюдаемого с борта i -го вертолета, можно определить из геометрических соображений (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} \sin \chi_i &= \left(\frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \cos \chi_i &= \left(\frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$i=1-2$.

Путем обращения уравнения (16) получим алгоритм идентификации ФМТ в поисковом приборном базисе $p_i = X_i Y_i Z_i$:

$$\begin{aligned} \bar{m}_{pi} &= [m_{xi} \ m_{yi} \ m_{zi}]^T = \\ &= \frac{4\pi r_i^5}{\mu\mu_0} \cdot [R_i]^{-1} \cdot \Delta\hat{T}_{ij}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\det[R_i] \neq 0 \quad (23)$$

$i=1-2$.

В географическом базисе $q = NHE$ вектор магнитного момента идентифицируемого ФМТ, наблюдаемого с борта i -го носителя, равен (рис. 1):

$$\begin{aligned} \bar{m}_{qi} &= [m_{Ni} \ m_{Hi} \ m_{Ei}]^T = \\ &= A_{\psi_i}^T \cdot [m_{xi} \ m_{yi} \ m_{zi}]^T \end{aligned} \quad (24)$$

$i=1-2$.

Модуль магнитного момента идентифицируемого ФМТ равен:

$$m_i = \left(m_{x_i}^2 + m_{y_i}^2 + m_{z_i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \left(m_{N_i}^2 + m_{H_i}^2 + m_{E_i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$i=1-2$.

Дальность r_0 обнаружения ФМТ с магнитным моментом диполя m для дифференциального магнитометрического обнаружителя-идентификатора типа МСОПСО с порогом чувствительности δT (нТл) и базой измерения ρ можно оценить по формуле [7]

$$r_0 \approx \left(\frac{300 \cdot m \cdot \rho}{\delta T} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (26)$$

Из формулы (26) видно, что чувствительность разработанных рабочих алгоритмов к обнаружению одиночных магнитных диполей определяется не только инструментальным порогом чувствительности (δT) блоков ТБМ, но и базой ρ между этими блоками (рис. 1).

При этом:

$$\bar{m}_q = [m_N \ m_H \ m_E]^T =$$

$$= A_\alpha \cdot A_\beta \cdot [m \ 0 \ 0]^T, \quad (27)$$

где A_α , A_β – матрицы углов ориентации вектора $\bar{m}$ ФМТ в горизонтальной и вертикальной плоскостях географического трехгранника $q = NHE$ (рис. 1).

На основе уравнения (27) из геометрических соображений находим углы азимута α и наклона β вектора $\bar{m}$ ФМТ (рис. 1):

$$\sin \alpha = \frac{m_E}{m \cdot \cos \beta}; \quad \cos \alpha = \frac{m_N}{m \cdot \cos \beta}$$

$$\sin \beta = \frac{m_H}{m}; \quad \cos \beta = \left(\frac{m_N^2 + m_E^2}{m^2} \right)^{1/2}. \quad (28)$$

Результаты и их обсуждение

Выражения (2) – (28) совместно определяют содержание алгоритмов обнаружения, локализации, позиционирования, пеленгации, идентификации и ориентации намагниченного ФМТ (табл. 2).

Таблица 2. Назначение и особенности алгоритмов обработки измерений ферромагнитных тел

Table 2. Purpose and features of processing algorithms for measuring ferromagnetic objects

№	Название алгоритма	Формулы, соотношения	Примечания
1	Алгоритмы обнаружения	(2) - (8)	Ограничения по порогам чувствительности ТБМ
2	Алгоритм локализации и позиционирования	(6) - (14) (17) - (20)	Проверка $\det[G_i] \neq 0$
3	Алгоритм пеленгации	(21)	Нормировка $\sin^2 \chi_i + \cos^2 \chi_i \equiv 1$
4	Алгоритм идентификации	(22) - (27)	Проверка $\det[R_i] \neq 0$
5	Алгоритм ориентации	(28)	Нормировка $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \equiv 1$ $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \equiv 1$

Выбор дистанции ρ между поисковыми вертолетами БПСВ-1 и БПСВ-2, задание высоты h и скоростей $v_i = v$ ($i = 1, 2$) их полета определяется косвенно по параметрам магнитного поля искомого ФМТ техногенного происхождения (табл. 1, рис. 1, 2, формула (26)). Особенность подхода к решению задачи дистанционного магнитометрического поиска и обнаружения ФМТ, предложенного в настоящей статье, заключается в том, что хотя в разработанных алгоритмах используются величины градиентов компонент магнитного поля, тем не менее, они определяются не путем градиентных измерений, а путем вычислений по измеренным компонентам на выбранной базе ρ .

Рабочие алгоритмы, сформированные в настоящей работе, характеризуются согласованностью комплексной обработки информационных и физических показателей (магнитные показатели), что позволяет автоматизировать на борту БПЛА процессы идентификации сигналов. Набор алгоритмов определяет облик МСОПСО и их элементов а также систематизирует требования к летательным аппаратам различного исполнения и назначения [10 – 16] в части разработ-

ки способов эксплуатации, идентификации данных.

Выводы

Алгоритмы поиска, обнаружения и идентификации ферромагнитных тел, разработанные в настоящей работе, используются для разработки ПО магнито-обнаружительно-поисковой системы с целью ее установки и использования на автономно-управляемых беспилотных летательных, плавающих и других аппаратах. Основным результатом исследования заключается в том, что рабочие алгоритмы обнаружения ферромагнитных тел учитывают в комплексе характеристики воздушной среды, инструментальную погрешность блоков измерений физических величин и геометрические пропорции расположения измерительной аппаратуры на борту беспилотных и пилотируемых поисково-спасательных вертолетов. Комплексный учет физических, информационных и геометрических параметров модели позволяет повысить эффективность процессов поиска за счет учета дополнительной информации в рабочих алгоритмах.

Список литературы

1. Модель и методы управления сложными техническим объектами на основе продукционной парадигмы вычислений / О.И. Атакищев, Е.А. Титенко, К.С. Скорняков, В.А. Заичко, А.П. Риос // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. №3. С. 181-187.
2. Богоева Е. М., Гарькушев А. Ю. Основы построения моделей интеллектуализации в системах безопасности // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9-10. С. 22-27.
3. Анисимов В. Г., Ведерников Ю. В. Научно-методическое сопровождение интеграции высокотехнологичных инноваций в процессы разработки высокоточного ору-

жия // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. №3-4. С. 66-75.

4. Анисимов В. Г., Гарькушев А. Ю., Сазыкин А. М. Оптимизация внедрения новых технологий в перспективные образцы артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 4. С. 39-44.

5. Бажин Д. А., Гарькушев А. Ю. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 1-2. С. 44-53.

6. Крюков И. Н. Магнитометрические средства обнаружения: теория и практика построения / под ред. И. Н. Крюкова. М.: Радиотехника, 2013. 192 с.

7. Бондарев А. С., Челкак С. И. Определение источника дипольного типа по измерениям напряженности магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1990. Т. 33. № 2. С. 33–38.

8. Ginzburg B., Sheinker A., Frumkis L. Investigation of advanced data processing technique in magnetic anomaly detection systems // Ist International conference of Sinsing Technology, November 21–23 2005. Palmerston North, New Zealand. 2005. P. 561– 566.

9. Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А. Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002. 228 с.

10. Ковадлин М. Ш., Сергушов И. В. Пилотажные комплексы и навигационные системы вертолетов. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 368 с.

11. Быстров Л. Г., Дрогайцев В. С. Методы идентификации динамических характеристик стационарных элементов бортовых систем управления // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 4. № 1. С. 63–71.

12. Дрогайцев В. С., Писарев В. Н. Технология процесса комплексирования автоматизированных средств испытания бортовых систем летательных аппаратов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2004. № 3. С. 53–76.

13. Батраева И. А., Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисково-спасательных операций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6. С. 210–214.

14. Атакищев О. И., Батраева И. А. Матричный метод планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата переменной массы // Известия Института инженерной физики. 2018. № 4. С. 93–98.

15. Лоторев П.В., Курочкин А.Г., Гривачев А.В., Емельянов С.Г. Организация системы поддержки принятия решений для управления группой роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3. С. 30-36.

16. Тетерин Д. П. Синтез требований к бортовому информационно-измерительному и моделирующему комплексу // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1. С. 10-14.

References

1. Atakishchev O.I., Titenko E.A., Skorniyakov K.S., Zaichko V.A., Rios A.P. Model' i metody upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi ob'ektami na osnove produktsionnoi paradigmy vychislenii [A Model and control methods for a complex technical objects based on the production computing]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = *News of the South Federal University. Technical Science*, 2012, no.3, pp. 181-187 (In Russ.).
2. Bogoeva E. M., Garkushev A. Yu. Osnovy postroeniya modelei intellektualizatsii v sistemakh bezopasnosti [The basis of a building models of the intellectualization in security systems.]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu* = *Issues of Defense Technology. Series 16: Counter Terrorism Techniques*, 2014, no. 9-10, pp. 22-27 (In Russ.).
3. Anisimov V.G., Vedernikov Yu.V. Nauchno-metodicheskoe soprovozhdenie integratsii vysokotekhnologichnykh innovatsii v protsessy razrabotki vysokotochnogo oruzhiya [A scientific and methodological support for the integration of high-tech innovations in the development of a high-precision weapons.]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu* = *Issues of Defense Technology. Series 16: Counter Terrorism Techniques*, 2014, no. 3-4, pp. 66-75 (In Russ.).
4. Anisimov V. G., Garkushev A. Yu., Sazykin A. M. Optimizatsiya vnedreniya novykh tekhnologii v perspektivnye obraztsy artilleriiskogo vooruzheniya [An optimization of the new technologies in promising models of artillery weapons]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk* = *News of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2012, no. 4, pp. 39-44 (In Russ.).
5. Bazhin D. A., Garkushev A. Yu. Model' otsenki effektivnosti informatsionnogo obespecheniya primeneniya vysokotochnogo oruzhiya v kontrterroristicheskikh operatsiyakh [A Model for evaluating of the efficiency of information complex for the use of precision weapons in counter-terrorist operations.]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu* = *Issues of Defense Technology. Series 16: Counter Terrorism Techniques*, 2015, no. 1-2, pp. 44-53 (In Russ.).
6. Kryukov I. N. *Magnitometricheskie sredstva obnaruzheniya: teoriya i praktika postroeniya* [Magnetometric means of a detection: theory and practice of a construction]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 192 p. (In Russ.).
7. Bondarev A.S., Chelkak S.I. Opredelenie istochnika dipol'nogo tipa po izmereniyam napryazhennosti magnitnogo polya [Determination of a dipole type source from a measurements of magnetic field strength]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*. = *News of the Higher Education. Instrumentation*, 1990, vol. 33, no. 2, pp. 33–38 (In Russ.).

8. Ginzburg B., Sheinker A., Frumkis L. Investigation of advanced data processing technique in magnetic anomaly detection systems. *Ist International conference of Sinsing Technology*, November 21–23 Palmerston North, New Zealand, 2005, pp. 561– 566.

9. Semevsky R. B., Averkiev V. V., Yarotsky V. A. *Spetsial'naya magnitometriya* [Special magnetometry]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2002, 228 p. (In Russ.).

10. Kovadlin M. Sh., Sergushov I.V. *Pilotazhnye komplekсы i navigatsionnye sistemy vertoletov* [Flight complexes and navigation systems of helicopters]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017, 368 p. (In Russ.).

11. Bystrov L. G., Drogaytsev V. S. Metody identifikatsii dinamicheskikh kharakteristik statsionarnykh elementov bortovykh sistem upravleniya [Methods for the identification of dynamic characteristics of stationary elements of the onboard control systems]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of the Saratov State Technical University*, 2009, vol.4, no.1, pp. 63–71 (In Russ.).

12. Drogaytsev V.S., Pisarev V.N. Tekhnologiya protsessa kompleksirovaniya avtomatizirovannykh sredstv ispytaniya bortovykh sistem letatel'nykh apparatov [Technology of the integrating of the automated testing means for a onboard aircraft systems]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information Technologies in Design and Industry*, 2004, no. 3, pp. 53–76 (In Russ.).

13. Batraeva I.A., Teterin D.P. Algoritm planirovaniya traektorii dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata pri vypolnenii poiskovo-spasatel'nykh operatsii [An algorithm for planning of a trajectory of an unmanned aircraft vehicle for search and rescue operations]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 210–214 (In Russ.).

14. Atakishchev O. I., Batraeva I. A. Matrichnyi metod planirovaniya traektorii dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata peremennoi massy [The matrix method of the trajectory planning for an unmanned aerial vehicle with a variable weight]. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = News of the Institute of Engineering Physics*, 2018, no. 4, pp. 93–98 (In Russ.).

15. Lotorev P.V., Kurochkin A.G., Grivachev A.V., Emelyanov S.G. Organizatsiya sistemy podderzhki prinyatiya reshenii dlya upravleniya gruppoy robotov [A decision support system for the control of a robot group]. *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*, 2015, no. 3, pp. 30–36.

16. Teterin D.P. Sintez trebovaniy k bortovomu informatsionno-izmeritel'nomu i modeliruyushchemu kompleksu [Synthesis of requirements for an on-board information-measuring and modeling complex]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information-control Systems*, 2009, no. 1, pp. 10–14 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Гуцевич Денис Евгеньевич, аспирант, младший научный сотрудник кафедры «Лаборатория систем и технических средств автоматики», Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, e-mail: den2538i@yandex.ru

Denis E. Gutsevich, Post-Graduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Systems and Engineering Automation Laboratory, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russian Federation, e-mail: den2538i@yandex.ru

Проскуряков Герман Михайлович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории технических средств и систем автоматики, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, e-mail: proskur.g.m@yandex.ru

German M. Proskuryakov, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher, Laboratory of Systems and Engineering Automation Laboratory, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russian Federation, e-mail: proskur.g.m@yandex.ru

Слонов Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технических средств и систем автоматики, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, e-mail: vnslonov@yandex.ru

Vladimir N. Slonov, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher, Laboratory of Systems and Engineering Automation Laboratory, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russian Federation, e-mail: vnslonov@yandex.ru

Тетерин Дмитрий Павлович, доктор технических наук, первый заместитель генерального директора АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tdp@aviaavtomatika.ru

Dmitry P. Teterin, Dr. of Sci. (Engineering), First Deputy General Director of JSC «Aviaavtomatika named after V.V. Tarasova», Kursk, Russian Federation, e-mail: tdp@aviaavtomatika.ru

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru

Evgeny A. Titenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, IT Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru

Фролов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, старший сотрудник научно-исследовательского института радиоэлектронных систем, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: snfrolov@bk.ru

Sergey N. Frolov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Research Institute of Radio Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: snfrolov@bk.ru

Лисицин Леонид Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: leo_263@mail.ru

Leonid A. Lisitzin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, IT Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: leo_263@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-225-240>

Модели и методика определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы

Е.Е. Усина ¹ ✉, А.Р. Шабанова ¹, И.В. Лебедев ¹

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

✉ e-mail: Lizzzi96@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Статья посвящена разработке модельно-алгоритмического обеспечения процесса определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы. Предложена топологическая модель распределенной подсистемы аудиозаписи, реализуемой в ограниченных физических пространствах (помещениях), позволяющая оценить качество воспринимаемых аудиосигналов для случая распределения микрофонов в таком помещении. На основе данной модели разработана методика определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы, максимизирующая качество воспринимаемых аудиосигналов при перемещении пользователя в помещении за счет определения координат установки микрофонов.

Методы. Для наиболее полного анализа и формального описания распределенной подсистемы аудиозаписи был использован математический аппарат теории графов и теории множеств. С целью определения координат размещения микрофонов в одном помещении была разработана соответствующая методика, которая предполагает проведение таких операций, как излучение в помещении речевого сигнала с помощью акустического оборудования и замер уровней сигнала в предполагаемых для установки микрофонов местах с использованием шумомера.

Результаты. Были рассчитаны зависимости коэффициента корреляции объединенного сигнала и исходного тестового сигнала от расстояния до источника сигнала для различного количества микрофонов. Полученные зависимости позволяют определить минимально необходимое количество разнесенных микрофонов для обеспечения качественной записи речи пользователя. Результаты апробации разработанной методики речевой активности в конкретном помещении свидетельствуют о возможности и высокой эффективности определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы.

Заключение. Использование предложенной методики определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы позволит повысить качество записи аудиосигнала и, как следствие, его последующей обработки с учетом возможного перемещения пользователя.

Ключевые слова: социо-киберфизическая система; речь; микрофоны; распределенная аудиозапись

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

Для цитирования: Усина Е.Е., Шабанова А. Р., Лебедев И.В. Модели и методика определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 225-240. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-225-240>.

Поступила в редакцию 11.11.2019

Подписана в печать 04.12.2019

Опубликована 23.12.2019

Models and a Tecnique for Determining the Speech Activity of a User of a Socio-Cyberphysical System

Elizaveta E. Usina ¹ ✉, Alexandra R. Shabanova ¹, Igor V. Lebedev ¹

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
39, 14-th Linia VI, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: Lizzzi96@mail.ru

Abstract

Purpose of reseach. The article presents the development of the model-algorithmic support for the process of determining the speech activity of a user of a socio-cyberphysical system. A topological model of a distributed subsystem of audio recordings implemented in limited physical spaces (rooms) is proposed; the model makes it possible to assess the quality of perceived audio signals for the case of distribution of microphones in such a room. Based on this model, a technique for determining the speech activity of a user of a socio-cyberphysical system, which maximizes the quality of perceived audio signals when a user moves in a room by means of determining the installation coordinates of microphones has been developed.

Methods. The mathematical tools of graph theory and set theory was used for the most complete analysis and formal description of the distributed subsystem of the audiorecording. In order to determine the coordinates of the placement of microphones in one room, a relevant technique was developed; it involves performing such operations as emitting a speech signal in a room using acoustic equipment and measuring signal levels using a noise meter in the places intended for installing microphones.

Results. The dependences of the correlation coefficient of the combined signal and the initial test signal on the distance to the signal source were calculated for a different number of microphones. The obtained dependences allow us to determine the minimum required number of spaced microphones to ensure high-quality recording of the user's speech. The results of testing the developed technique for determining speech activity in a particular room indicate the possibility and high efficiency of determining the speech activity of a user of a socio-cyberphysical system.

Conclusion. Application of the proposed technique for determining the speech activity of a user of a socio-cyberphysical system will improve the recording quality of the audio signal and, as a consequence, its subsequent processing, taking into account the possible movement of a user.

Keywords: socio-cyberphysical system; speech; microphones; distributed audio recording.

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

For citation: Usina E. E., Shabanova A. R., Lebedev I. V. Models and a Tecnique for Determining the Speech Activity of a User of a Socio-Cyberphysical System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 225-240 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-225-240>.

Received 11.11.2019

Accepted 04.12.2019

Published 23.12.2019

Введение

В условиях непрерывного технического и технологического прогресса концепция Интернета вещей [1] – связанных в вычислительную сеть физических устройств – является основой киберфизических систем [2, 3]. Последние интегрируют доступные вычислительные ресурсы и обеспечивают совместную работу элементарных частей физического и кибернетического пространств. При введении в указанные системы человека,

зических систем [2, 3]. Последние интегрируют доступные вычислительные ресурсы и обеспечивают совместную работу элементарных частей физического и кибернетического пространств. При введении в указанные системы человека,

как части киберфизических систем, образуется социо-киберфизическая система [4-6].

Рассматривая элементы физического пространства — датчики социо-киберфизических систем, необходимо отметить большое разнообразие их видов, которое определяется измеряемыми физическими величинами (давление, температура, плотность, масса и т.д.), их совокупностями и видами воспринимаемой информации (акустическая, текстовая, видео и т.д.).

Так как в реалиях современного мира общение между людьми и управление различными системами все чаще происходит посредством голоса — широкий спектр возможностей по комфортному общению и голосовому управлению в любой точке ограниченных физических пространств (помещений) может быть предоставлен с использованием множества распределенных микрофонов¹ [7-9]. Например, одним из вариантов их применения может стать разговор пользователя в помещении без использования им смартфона и других дополнительных устройств детектирования и записи голоса.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость размещения микрофонов в некотором помещении с учетом того, чтобы *распределенная подсистема*

аудиозаписи (РПА) могла детектировать перемещающегося пользователя, распознавать его голосовые команды и выполнять их. Под РПА в данном случае необходимо понимать распределенную физическую подсистему социо-киберфизической системы записи, обработки, распознавания команд пользователя и взаимодействия с ним, которую составляют: множество микрофонов, устройства аудиозаписи с микрофонов, устройство управления включением микрофонов, устройство обработки и объединения аудиозаписей.

Передовыми российскими исследователями и разработчиками систем высококачественной записи, обработки и анализа аудиоинформации являются компании «ЦРТ» и «ЦРТ-инновации» [10], занимающиеся, в том числе, и разработкой систем распределенной аудиозаписи («Незабудка», «Нестор» и др.) и АО «ОКБ «Октава» (разработчик микрофонов, микрофонных капсулей и гарнитур) [11]. При разработке указанных систем большое внимание уделено алгоритмам шумоочистки и совместной обработки записанных аудиосигналов, однако вопросы размещения микрофонов в помещениях остаются недостаточно проработанными.

Следовательно, необходимо разработать модельно-алгоритмическое обеспечение для создания распределенной подсистемы аудиозаписи, позволяющей определять речевую активность пользователя социо-киберфизической системы и необходимой для определения наи-

¹ Ронжин А.Л. Методы и программные средства многоканальной дистанционной обработки речи и их применение в интерактивных многомодальных приложениях: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2010. 330 с.

лучшего расположения микрофонов на инженерных конструкциях здания для качественной записи и распознавания речи с учетом возможного перемещения пользователя.

Проектирование РПА в настоящее время основано на нескольких способах размещения микрофонов:

- гарнитурный (непосредственное расположение возле рта);
- петличный (расположение микрофона вблизи рта на одежде диктора);
- настольный/напольный (перед диктором в направлении распространения звуковой волны);
- распределенное множество микрофонов¹ [7-101].

Первые три способа связаны с определенной подготовкой пользователя для записи голоса (закрепление гарнитуры на голове, установка микрофона на предметы одежды, расположение рта пользователя в непосредственной близости от микрофона), при этом пользователь постоянно испытывает некоторый дискомфорт, вызываемый необходимостью подстраиваться под требования систем записи речи (переносить на себе элементы датчиков, располагаться статично, говорить четко по направлению к микрофону).

Четвертый способ является наиболее подходящим для разработки РПА,

так как не требует от пользователя дополнительной подготовки. Множество направленных микрофонов представляет возможность использовать превосходства бинаурального эффекта [12-14].

Рассмотренные схемы расположения распределенного множества микрофонов, существующие в настоящее время, являются пригодными лишь для статичного пользователя. Но при разработке РПА необходимо учитывать, что пользователь может перемещаться по помещениям и зданию. Поэтому возникает необходимость создания научно-методического инструментария для определения мест установки микрофонов РПА.

Материалы и методы

1. Топологическая модель распределенной подсистемы аудиозаписи

Моделирование структуры РПА произведем на примере одноэтажного здания, схема которого представлена на рис.1. В указанном здании границами перемещений пользователя являются ограждающие конструкции: внутренние и внешние стены, двери, окна, части перекрытий, пол, потолок.

Наиболее полно анализ РПА можно провести с помощью математического аппарата теории графов, разработав топологическую структуру РПА. Соответствующая примерной схеме здания топологическая структура в виде графа показана на рис. 2.

Для графа топологической структуры РПА $G_{\text{ТОП}}(V, E, I_G)$ с множеством вершин $V=\{v_i\}$, $i=1,..., N_y$), соответ-

¹ Ронжин А.Л. Методы и программные средства многоканальной дистанционной обработки речи и их применение в интерактивных многомодальных приложениях: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2010. 330 с.

ствующих элементам (подсистемам) РПА (N_y – число микрофонов), множеством ребер $E = \{e_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, N_y$, соответствующих направлениям прохождения сигналов, и связностью I_G , задаются взаимное расположение микро-

нов a_i в виде координат $\{x_i, y_i\}$ в помещении и конструктивное исполнение отдельных узлов и блоков средства, что позволяет анализировать (рассчитывать) энергетические характеристики акустических сигналов и т. п.

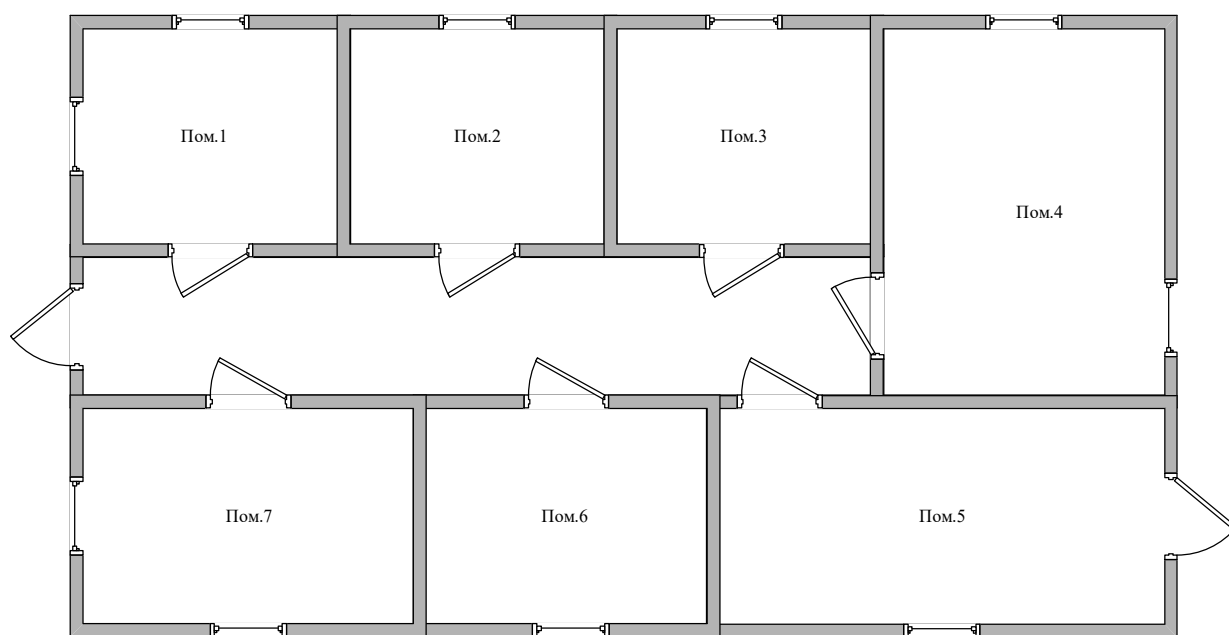


Рис. 1. Примерная схема одноэтажного здания

Fig. 1. Approximate layout of a one-floor building

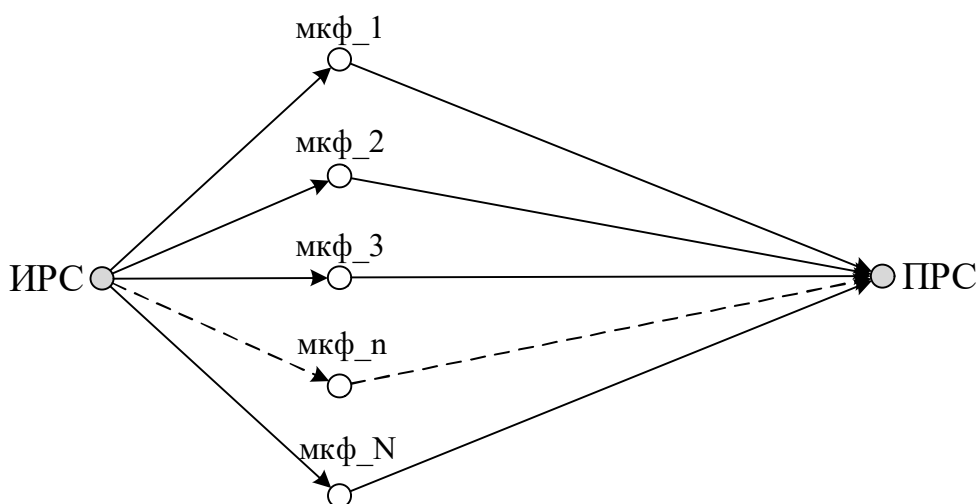


Рис. 2. Топологическая структура РПА: ИРС – источник речевого сигнала; ПРС – приемник речевого сигнала

Fig. 2. Topological structure of DARS: ИРС – speech signal source; ПРС – speech signal receiver

С учетом представленной структуры для формального описания РПА введем следующие множества:

– множество $D = \{d_h\}$, $h = \{1, \dots, N\}$ устройств преобразования речевых сигналов;

– множество задач $i = \{1, \dots, I\}$ (этапов $z = \{1, \dots, z_i\}$) РПА и их вариантов $k = \{1, \dots, K\}$;

– множество преобразований $W = \{w_o\}$, $o = \{1, \dots, O\}$, выполняемых при обработке речевой информации;

– множества потоков сигналов $S = \{s_e\}$, $e = \{1, \dots, E\}$, использующихся для анализа входных $S^0 = \{S_1^0, S_2^0, \dots, S_{N_s}^0\}$ и синтеза выходных $S' = \{S_1', S_2', \dots, S_{N_s}'\}$ сигналов;

– множество допустимых системo-технических решений $\Delta_\alpha = \{\alpha = \langle mm, mo, al, ap \rangle \mid mm \in MM, mo \in MO, al \in AL, ap \in AP\}$ включающее подмножества математических моделей MM , математических методов MO , алгоритмов AL и программно-аппаратных реализаций процесса объединения перехваченных сигналов;

– множество узлов функциональных структур $j = \{1, \dots, J\}$ и вариантов их построения $p = \{1, \dots, P\}$.

Топологическая структура РПА включает в себя объединенные структурные элементы с фиксированным расположением в здании и может быть

преобразована для дальнейшего анализа в функциональную структуру РПА.

Для всей группы каналов N микрофонов сигнал можно представить в виде следующей системы:

$$\begin{cases} s_1(t) = \gamma_1 \cdot s(t - \tau_1) + N_1(t) \\ s_2(t) = \gamma_2 \cdot s(t - \tau_2) + N_2(t) \\ \vdots \\ s_n(t) = \gamma_n \cdot s(t - \tau_n) + N_n(t) \\ \vdots \\ s_N(t) = \gamma_N \cdot s(t - \tau_N) + N_N(t), \end{cases} \quad (1)$$

где γ_n – постоянный коэффициент передачи канала; τ_n – задержка в канале n -ого микрофона; $N_n(t)$ – аддитивный шум в канале n -ого микрофона.

Для объединенного сигнала $s'(t)$ в приемнике можно получить следующее выражение:

$$s'(t) = s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_n(t) + \dots + s_N(t) = \sum_N s_N(t). \quad (2)$$

Общее выражение для сигнала в приемнике будет выглядеть следующим образом:

$$s'(t) = \sum_n \left(\gamma_n \cdot s(t - \tau_n) + N_n(t) \right). \quad (3)$$

Тогда соотношение «сигнал-шум» на входе анализатора (решающего устройства) примет следующую форму:

$$\Delta = \frac{\left(\sum_n \left(\gamma_n \cdot s(t - \tau_n) \right) \right)^2}{D \left[\sum_n N_n(t) \right]}. \quad (4)$$

Учитывая при расчетах возможность синхронизации сигналов в каждом из n каналов можно прийти к выводу о равенстве задержек при распространении ре-

чевого сигнала, то есть $\sum_n \tau_n = 0$. Тогда

при $M\left[\sum_n N_n(t)\right] = 0$ и коэффициентах

корреляции $r_{N_i N_j} \ll r_{s_x(t) s_y(t)}$ ($i \neq j$, $x \neq y$) выражение (4) преобразуется к следующему виду:

$$\Delta = \frac{\left(n \cdot s(t) \cdot \sum_n (\gamma_n)\right)^2}{\sum_n D\left[\sum_n N_n(t)\right]}. \quad (5)$$

Суммарный уровень шума в каждом из каналов $\sum_n N_n(t)$ можно обозначить как $N_n(t)$:

$$\Delta = \frac{n^2 \cdot s^2(t) \cdot \left(\sum_n \gamma_n\right)^2}{\sum_n D[N_n(t)]}. \quad (6)$$

При равенстве параметров распределений шумовых сигналов $N_n(t)$ [15] выражение для соотношения «сигнал-шум»:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{m^2 \cdot s^2(t) \cdot \left(\sum_n \gamma_n\right)^2}{m \cdot D[N(t)]} = \\ &= \frac{m \cdot s^2(t) \cdot \left(\sum_n \gamma_n\right)^2}{\sigma^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Отношение «сигнал-шум» с учетом одного канала (микрофона) определяется следующей формулой:

$$\Delta_0 = \frac{P_c}{P_{ш}} = \frac{s^2(t) \cdot \gamma_n^2}{\sigma^2}. \quad (8)$$

При коэффициентах передачи каналов $\gamma_n \rightarrow 1$ за счет распределенной аудиозаписи можно получить выигрыш по соотношению сигнал шум в n раз, где n –

количество одновременно записывающих микрофонов, что определяет теоретический максимум повышения значения отношения «сигнал-шум» для РПА.

Установлено, что с ростом числа каналов (микрофонов) повышается коэффициент корреляции между речевым сигналом источника и совокупным сигналом приемника (рис. 3).

Для расчета коэффициента корреляции между дискретизированными речевым сигналом источника $s(t)$ и совокупным сигналом приемника $s'(t)$ необходимо пользоваться следующим выражением [16]:

$$\begin{aligned} r_{ss'} &= \frac{\text{cov}(s, s')}{\sigma_s \cdot \sigma_{s'}} = \\ &= \frac{M\{[s - M(s)] \cdot [s' - M(s')]\}}{\sqrt{D(s)} \cdot \sqrt{D(s')}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $M(...)$ – математическое ожидание; $D(...)$ – дисперсия.

Результаты моделирования свидетельствуют о возможности повышения качества воспринимаемого РПА сигнала для случая распределения микрофонов в помещении.

2. Методика размещения микрофонов распределенной подсистемы аудиозаписи

Для описания методики размещения микрофонов РПА необходимо ввести некоторые ограничения и допущения:

– звук от источника распространяется с одинаковой скоростью и одинаковым затуханием во все стороны сферы R (R – максимальное расстояние от источника, на котором возможно детек-

тирование и аудиозапись с помощью микрофонов);

- источник один, перемещается в горизонтальной плоскости (на одной высоте $h=1,7$ м без изменения вертикального положения);

- уровень речевого сигнала постоянен (75 дБА) или сигнал отсутствует;

- уровень шума ограничивается отметкой 50 дБА (тихо или слегка шумно);

- коэффициенты поглощения материалов мебели и отделки помещений менее 0,2 (коэффициентами поглощения для обеспечения точности расчетов

$\pm 1\%$ можно пренебречь);

- время реверберации в помещении не превышает 50 мс;

- объем помещений ограничивается плоским потолком, плоскими стенами и плоским полом;

- микрофоны РПА размещаются на стенах или потолке;

- траектория движения источника сигнала известна и задается матрицей $Tr(x, y)$;

- при невозможности размещения датчиков РПА на стенах, они размещаются на потолке.

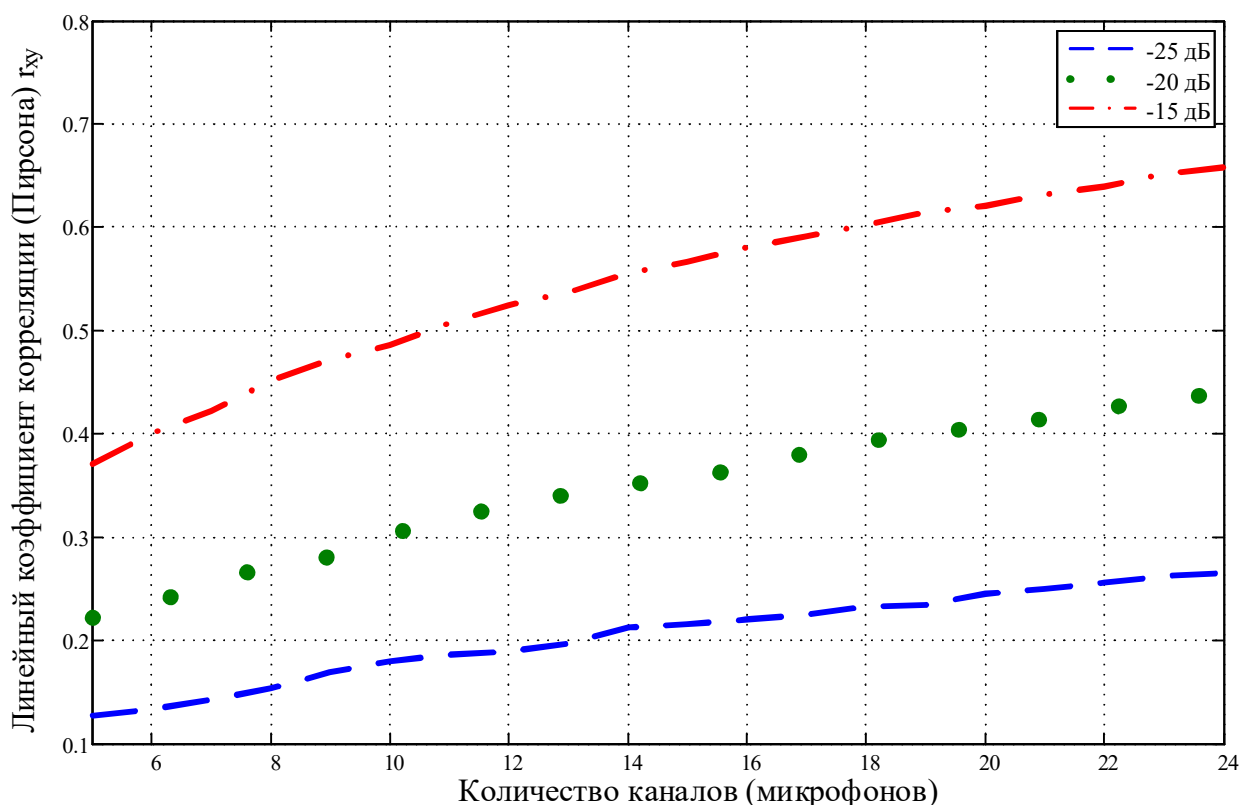


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции между исходным сигналом и совокупным сигналом от количества каналов (микрофонов) для различного отношения сигнал-шум

Fig. 3. Correlation of source signal and aggregate signal on the number of channels (microphones) for different signal-noise ratios

Методика размещения микрофонов РПА предполагает проведение следующих операций:

- излучение в помещении с помощью акустического оборудования речевого сигнала (тестового);

– замер с использованием шумомера уровней сигнала в предполагаемых для установки микрофонов местах (стены и потолок);

– определение расстояния R .

Приборы и оборудование:

– акустическая широкополосная звуковоспроизводящая система с возможностью воспроизведения сигналов с интегральным уровнем не менее 90 дБ;

– шумомер (например, «ЭкоФизика») для настройки акустической звуковоспроизводящей системы на уровень, соответствующий разговорной речи;

– набор аудиофайлов с записями тестового речевого сигнала для воспроизведения через акустическую систему.

Требования к тестовому речевому сигналу, применяемому для методики размещения микрофонов РПА:

– озвученная диктором запись тестовых фраз из ГОСТ 50840¹;

– параметры аудиофайла: формат аудиофайла WAV, частота дискретизации не ниже 22 кГц, квантование 16 бит, продолжительность от 10 с до 20 с, моно;

– средства воспроизведения: акустическая система, позволяющая воспроизводить звук в диапазоне 100 Гц – 20 кГц, отношение сигнал-шум не ниже 75 дБ.

Для определения сферы R для РПА необходимо выбрать микрофоны. Характеристики современных микрофонов приведены в табл.

Исходные данные:

– план помещений, в которых предполагается размещение микрофонов РПА;

– характеристики выбранных микрофонов;

– матрица координат $Tr(x,y)$ траектории движения источника сигнала (рис. 4):

$$Tr = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 3,5 & 3,5 & 2 & 0,8 & 0,5 & 1 & 0,7 & \Lambda \\ 5 & 5,3 & 6,5 & 7,5 & 7,8 & 7,8 & 7 & 6,5 & 5,3 & \end{bmatrix}.$$

Таблица. Характеристики современных микрофонов

Table. Modern microphones characteristics

Название	STELBERRY					
	У М-10	М-20	М-30	М-40	М-50	М-60
Тип микрофона	Высокочувствительный активный микрофон	Высокочувствительный активный микрофон	Высокочувствительный активный микрофон	Высокочувствительный активный микрофон	Высокочувствительный активный микрофон	Сверхчувствительный MEMS
Ветровая защита	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть

¹ ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Издательство стандартов, 1995. 234 с.

Название	STELBERRY					
	У М-10	М-20	М-30	М-40	М-50	М-60
Металлический корпус от электромагнитных помех	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Регулировка усиления	Нет	Ручная	Автоматическая	Ручная/ автоматическая	Ручная/ автоматическая	
Скорость срабатывания АРУ, с	—	—	0,25	0,25	0,0007	
Стабилизатор напряжения	Нет	Нет	Есть	Есть	Есть	
Цифровой					Да	
Отношение сигнал/шум						63 дБ (1400 раз)
Реалистичный звук (эффект присутствия)						Да
Полоса пропускания, Гц	100...6100	100...7200	100...8300	100...9200	270...4000	80...16000

Методика размещения микрофонов РПА для одного помещения включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Определение точки $(x_i; y_i)$ траектории движения источника, ближайшей ко входу в помещение.

Шаг 2. Излучение акустического сигнала из точки $(x_i; y_i)$ в пространство помещения.

Шаг 3. Нахождение с помощью шумомера точки с максимальным уровнем речевого сигнала на фоне присутствующих акустических (вибракустических) шумов в районе поверхности стены и потолка (нахождение точки R_i).

Шаг 4. Сравнение характеристики микрофона (динамический диапазон, чувствительность) с уровнем речевого сигнала в точке R_i .

Шаг 5. Если уровень речевого сигнала U_i достаточен (соответствует) для корректной записи микрофоном ($U_i > U_{min}$, где U_{min} – минимально возможный для записи микрофоном уровень речевого сигнала), то точка R_i фиксируется в качестве места расположения микрофона.

Шаг 6. Если уровень речевого сигнала в точке R_i не достаточен (не соответствует) для корректной записи микрофоном, то необходимо выбрать микрофон с другими характеристиками (или расположение микрофона не на стене или потолке).

Шаг 7. Передвижение по траектории $Tr(x, y)$ к следующей точке $(x_{i+1}; y_{i+1})$ с постоянными измерениями уровня речевого сигнала на фоне присутствующих акустических (вибракустических) шумов в фиксированной для установки микрофона точке R_i пока $U_i > U_{min}$.

Шаг 8. Если точка $(x_{i+1}; y_{i+1})$ в матрице Tr существует (не вся траектория пройдена), то переход на **Шаг 2**.

$$R = \begin{bmatrix} 2,5 & 3,2 & 3,1 & 3,7 & 2,9 & 2 & 1 & 0 & 1,5 & \Lambda \\ 5 & 5 & 6,3 & 7,6 & 8 & 7,5 & 8 & 7 & 5,5 & \end{bmatrix}.$$

На плане пом. 1 одноэтажного здания (рис. 1) нанесены места установки

В результате работы алгоритма создается матрица координат установки микрофонов R для плана помещений:

микрофонов в соответствии со значениями координат матрицы R (рис. 5).

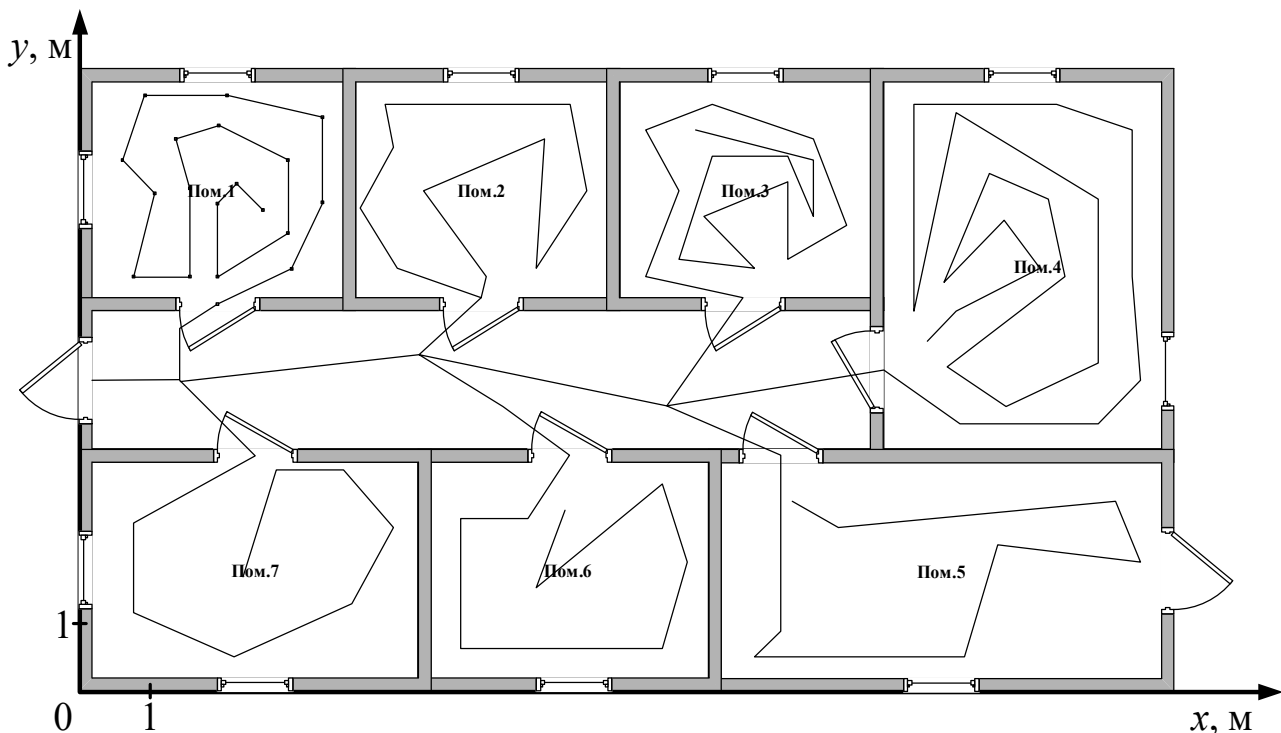


Рис. 4. Примерная схема одноэтажного здания с нанесенной траекторией движения источника

Fig. 4. Approximate layout of a single-storey building with plotted movement pattern of a signal source

Результаты и их обсуждение

По результатам работы алгоритма были получены координаты установки микрофонов. С использованием различного количества микрофонов, установленных в соответствии с координатами соседних столбцов матрицы R , были записаны тестовые фразы от источника сигнала, находящегося на расстоянии от 1 до 5 м. Для каждого записанного объединенного сигнала рассчитано значение коэффициента корреляции Пирсона

на, являющегося показателем качества записанного сигнала¹ [16], получены зависимости коэффициента корреляции объединенного сигнала и исходного тестового сигнала от расстояния до источника сигнала для различного количества микрофонов, по которым были построены соответствующие зависимости (рис. 6).

¹ ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Издательство стандартов, 1995. 234 с.

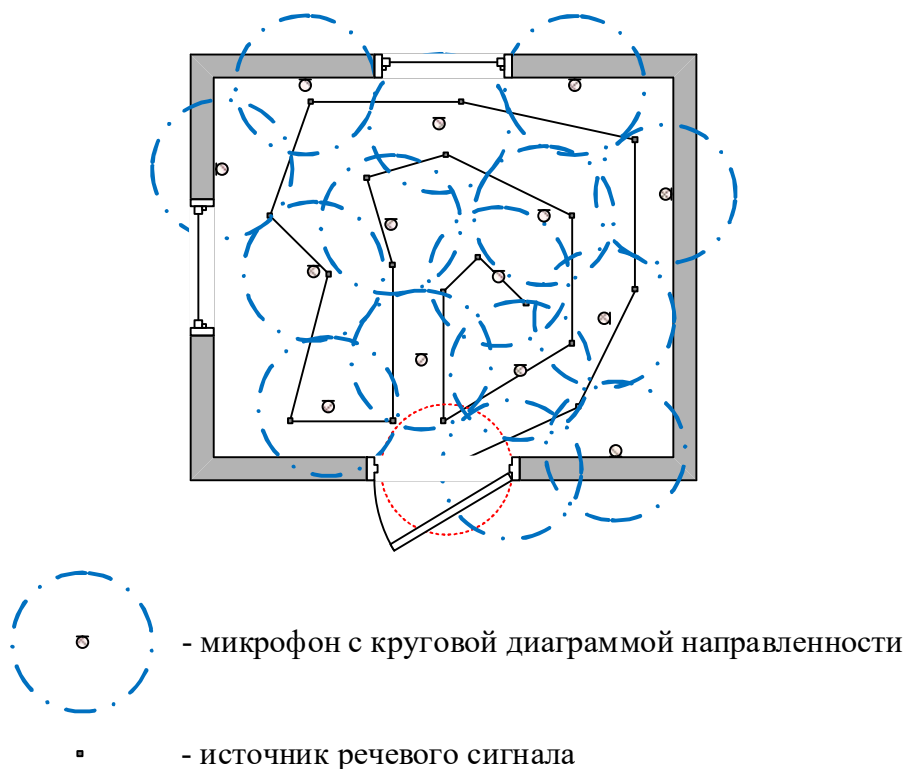


Рис. 5. Иллюстрация методики на примере пом. 1 одноэтажного строения

Fig. 5. Methodology illustrated on example of Room 1 of one-floor building

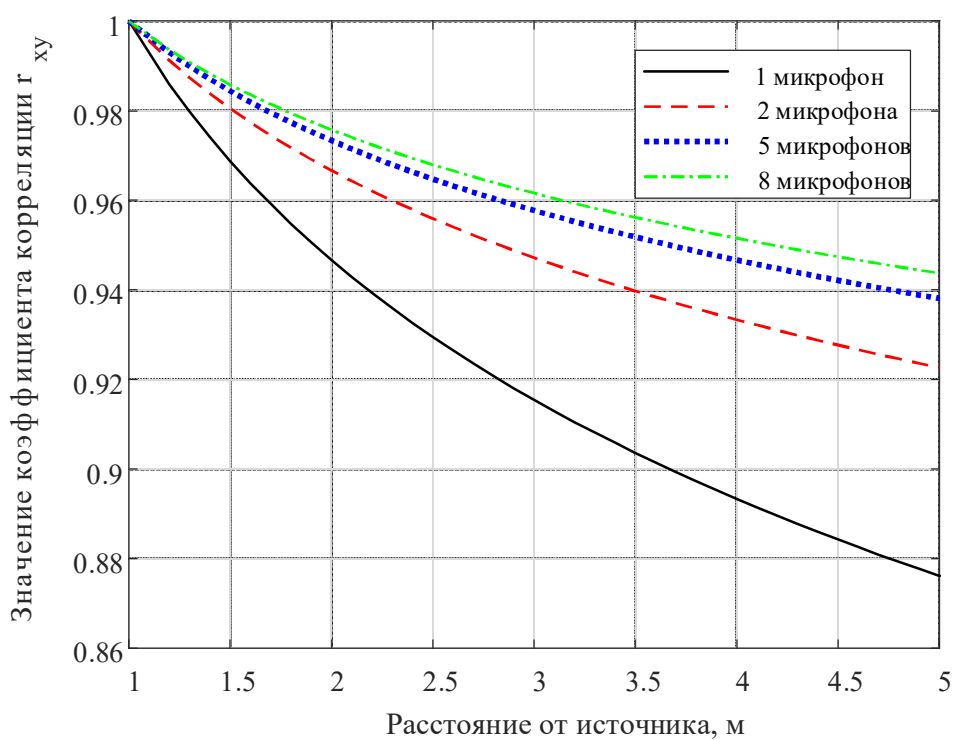


Рис. 6. Графики зависимости разборчивости от количества микрофонов для аудиозаписи

Fig. 6. Dependency diagram of speech intelligibility on the number of audio-recording microphones

Полученные зависимости позволяют определить минимально необходимое количество разнесенных микрофонов для обеспечения качественной записи речи пользователя в РПА. В данном случае с учетом ограничений и допущений, описанных в начале раздела, необходимо использовать не менее пяти микрофонов. Увеличение количества задействованных микрофонов приводит к незначительному выигрышу в качестве сигнала.

Выводы

В современном мире при решении вопросов организации эффективного взаимодействия физических, кибернетических подсистем и человека, а также оптимального распределения имеющихся ресурсов между ними прочные позиции заняли социо-киберфизические системы.

На сегодняшний день одним из основных видов обрабатываемой информации в таких системах является акустическая, а именно речь человека [17, 18]. Разработчики систем высококачественной записи, обработки и анализа аудиоинформации большое внимание уделяют разработке алгоритмов шумочистки и совместной обработки записанных аудиосигналов, тогда как открытым остается вопрос размещения микрофонов в ограниченных физических пространствах для записи голоса пользователя.

Применение разработанной методики определения речевой активности пользователя социо-киберфизической системы позволит повысить качество записи аудиосигнала и, как следствие, его последующей обработки с учетом возможного перемещения пользователя.

Список литературы

1. Internet of Things, IoT European Research Cluster. [процитировано 6 ноября 2019]. URL: http://www.internet-of-things-research.eu/about_iot.htm
2. Teaching Smart Production: An insight into the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems (LVP) / L. Merkela, J. Atuga, L. Merhara, C. Schultza, S. Braunreuthera, G. Reinharta // *Procedia Manufacturing*. 2017. №9. P. 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.034>
3. Knowledge-Based Decision Making in a CyberPhysical Production Scenario / J. Klöber-Koch, S. Pielmeier, J. Grimm, M. Brandt, M., Schneider G. Reinhart // *7th Conference on Learning Factories*. 2017. №7. P. 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.014>
4. Jiang P., Ding K., Leng J. Towards a cyber-physical-socialconnected and service-oriented manufacturing paradigm: Social Manufacturing // *Manufacturing Letters*. 2016. №7. P. 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2015.12.002>
5. Cassandras C.G. Smart Cities as Cyber-Physical Social Systems // *Engineering*. 2016. №2. P. 156-158. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.02.012>

6. Смирнов А.В., Левашова Т.В. Приобретение знаний в социокиберфизических системах в процессе информационного взаимодействия ресурсов // Информационно-управляющие системы. 2017. №6. Р. 113–122.
7. Мазуренко И.Л. Многоканальная система распознавания речи // Сборник трудов VI всероссийской конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». М., 2000.
8. Beyond Close-talk – Issues in Distant Speech Acquisition, Conditioning Classification, and Recognition / V. Stanford, C. Rochet, M. Michel, J.N Garofolo / Proc. ICASSP 2004 Meeting Recognition Workshop. 2004. Р. 123-127.
9. Pfau T., Ellis D. P. W., Stolcke A. Multispeaker speech activity detection for the ICSI meeting recorder // IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding. 2001. Р. 107-110. <https://doi.org/10.1109/ASRU.2001.1034599>
10. Центр речевых технологий. 2019 [протитировано 6 ноября 2019]. URL: <http://www.speechpro.ru>
11. АО «ОКБ «Октава». 2019 [протитировано 6 ноября 2019]. URL: <https://www.окбоктава.рф>
12. Акустика / Ш.Я. Вахитов, Ю.А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев. М.: Горячая линия, 2009.
13. Разработка многомодального информационного киоска / А.Л. Ронжин, А.А. Карпов, А.Б., Леонтьева Б.Е. Костюченко // Труды СПИИРАН. 2007. №5(1). С. 227-245.
14. Ронжин А.Л., Карпов А.А., Кагиров И.А. Особенности дистанционной записи и обработки речи в автоматах самообслуживания // Информационно-управляющие системы. 2009. №42(5). С. 32-38.
15. Харкевич А.А. Борьба с помехами. Изд. 4-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.
16. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
17. Ogunfunmi T., Togneri R., Narasimha M. Speech and audio processing for coding, enhancement and recognition. New York : Springer, 2015.
18. Марковников Н.М., Кипяткова И.С. Аналитический обзор интегральных систем распознавания речи // Труды СПИИРАН. 2018. №3. С. 77-110. <https://doi.org/10.15622/sp.58.4>

References

1. Internet of Things, IoT European Research Cluster. [Quoted November 6, 2019]. Available at: http://www.internet-of-things-research.eu/about_iot.htm
2. Merkela L., Atuga J., Merhara L., Schultza C., Braunreuthera S., Reinharta G. Teaching Smart Production: An insight into the Learning Factory for Cyber-Physical Production

Systems (LVP). *Procedia Manufacturing*, 2017, no. 9, pp. 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.034>

3. Klöber-Koch J., Pielmeier S. Grimm J., Brandt M., Schneider M., Reinhart G. Knowledge-Based Decision Making in a CyberPhysical Production Scenario. *7th Conference on Learning Factories*, 2017, no. 7, pp. 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.014>

4. Jiang P., Ding K., Leng J. Towards a cyber-physical-socialconnected and service-oriented manufacturing paradigm: Social Manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2016, no. 7, pp. 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2015.12.002>

5. Cassandras C.G. Smart Cities as Cyber-Physical Social Systems. *Engineering*, 2016, no. 2, pp. 156-158. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.02.012>

6. Smirnov A.V., Levashova T.V. Priobretenie znaniy v sotsiokiberfizicheskikh sistemakh v protsesse informatsionnogo vzaimodeistviya resursov [The acquisition of knowledge in sociocyberphysical systems in the process of information interaction of resources]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2017, no.6, pp. 113–122 (In Russ.)

7. Mazurenko I.L. Mnogokanal'naya sistema raspoznavaniya rechi [Multi-channel speech recognition system]. *Sbornik trudov VI vserossiiskoi konferentsii "Neirokomp'yutery i ikh primeneniye"* [Proceedings of the VI All-Russian conference "Neurocomputers and their application"]. Moscow, 2000. (In Russ.).

8. Stanford V., Rochet C., Michel M., Garofolo J. Beyond Close-talk – Issues in Distant Speech Acquisition, Conditioning Classification, and Recognition. *Proc. ICASSP 2004 Meeting Recognition Workshop*, 2004, pp. 123-127.

9. Pfau T., Ellis D. P. W., Stolcke A. Multispeaker speech activity detection for the ICSI meeting recorder. *IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding*, 2001, pp. 107-110. <https://doi.org/10.1109/ASRU.2001.1034599>

10. Centr rechevykh tekhnologiy [Speech technology center]. 2019 [Quoted November 6, 2019]. Available at: <http://www.speechpro.ru> (In Russ.).

11. AO "OKB "Oktava". 2019 [Quoted November 6, 2019]. Available at: <https://www.okboktava.pf> (In Russ.).

12. Vakhitov Sh.Ya., Kovalgin Yu.A., Fadeev A.A., Shcheviev Yu.P. *Akustika* [Acoustics]. Moscow, *Goryachaya liniya Publ.*, 2009. (In Russ.).

13. Ronzhin A.L., Karpov A.A., Leontyeva A.B., Kostyuchenko B.E. Razrabotka mnogomodal'nogo informatsionnogo kioska [The development of the multimodal information kiosk]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2007, no. 5(1), pp. 227-245 (In Russ.)

14. Ronzhin A.L., Karpov A.A., Kagiroy I.A. Osobennosti distantsionnoi zapisi i obrabotki rechi v avtomatakh samoobsluzhivaniya [Features of remote recording and speech processing in self-service machines]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and control systems*, 2009, no. 42(5), pp. 32–38 (In Russ.)

15. Kharkevich A.A. *Bor'ba s pomekhami* [Struggle against interference]. Moscow, Knizhnyi dom "LIBROKOM" Publ., 2013 (In Russ.)
16. Sklar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. Moscow, Izdatel'skii dom "Vil'yams" Publ., 2003 (In Russ.)
17. Ogunfunmi T., Togneri R., Narasimha M. *Speech and audio processing for coding, enhancement and recognition*. New York, Springer Publ., 2015.
18. Markovnikov N.M., Kipyatkova I.S. Analiticheskii obzor integral'nykh sistem raspoznavaniya rechi [An Analytic Survey of End-to-End Speech Recognition Systems]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 3, pp. 77-110 (In Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.58.4>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Усина Елизавета Евгеньевна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Lizzzi96@mail.ru

Elizaveta E. Usina, Junior Researcher, Laboratory of Big Data Technologies of Sociocyberphysical Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: Lizzzi96@mail.ru

Шабанова Александра Романовна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: iialex.shabanovaii@gmail.com

Alexandra R. Shabanova, Junior Researcher, Laboratory of Big Data Technologies of Sociocyberphysical Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: iialex.shabanovaii@gmail.com

Лебедев Игорь Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: igorlevedev@gmail.com

Igor V. Lebedev, Junior Researcher, Laboratory of Big Data Technologies of Sociocyberphysical System, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: igorlevedev@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-241-255>

Исследование эффективности использования информационных технологий в системе управления техносферной безопасностью

В.М. Попов ¹, В.В. Юшин ¹ ✉, А.В. Иорданова ¹, А.П. Трифонов ¹

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

✉ e-mail: otios@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является оценка потенциала использования информационных технологий, в частности мобильных многофункциональных устройств, в сфере охраны труда в качестве дополнительного вида контроля вредных производственных факторов.

Методы. Одним из главных методов в данном исследовании является эксперимент, заключающийся в проведении лабораторных измерений уровня искусственно созданного производственного шума с помощью мобильного многофункционального устройства (смартфона) с предустановленными на него утилитами и откалиброванного прибора – шумомера, и последующем сравнении полученных результатов. Измерения проводились в соответствии с разработанными авторами методическими указаниями, ориентированными непосредственно под мобильные многофункциональные устройства (ММФУ).

Результаты. Анализ полученных результатов позволил оценить возможность использования мобильных многофункциональных устройств в мониторинге вредных факторов производственной среды. В ходе выполнения исследований было выявлено, что применение ММФУ в системе управления охраной труда на предприятии возможно, так как отклонения полученных значений от значений откалиброванного шумомера, принятого за эталон, незначительны. По результатам исследования была разработана принципиальная схема использования мобильных многофункциональных устройств в системах управления охраной труда на предприятии.

Заключение. Таким образом, применение ММФУ в качестве дополнительного метода контроля параметров производственной среды с теоретической точки зрения возможно. Конечно следует отметить, что на практике применение ММФУ в системе управления охраной труда столкнется с рядом юридических и методологических проблем. Самая основная проблема заключается в том, что ни одно ММФУ не внесено в государственный реестр средств измерений, что не позволяет официально использовать полученные данные. Однако применение мобильных многофункциональных устройств в сфере охраны труда обеспечит оперативный сбор информации об изменении показателей вредных факторов производственной среды, и как следствие, позволит быстро отреагировать на данные изменения, что существенно снизит риск возникновения несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

Ключевые слова: мобильные многофункциональные устройства; управление охраной труда; вредный производственный фактор; шум.

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

Финансирование. Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.

© Попов В.М., Юшин В.В., Иорданова А.В., Трифонов А.П., 2019

Для цитирования: Исследование эффективности использования информационных технологий в системе управления техносферной безопасностью / В.М. Попов, В.В. Юшин, А.В. Иорданова, А.П. Трифонов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 241-255. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-241-255>.

Поступила в редакцию 09.10.2019

Подписана в печать 27.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Study of the Effectiveness of the Application of Information Technology in the Technosphere Safety Management System

Victor M. Popov¹, Vasily V. Yushin¹ ✉, Anastasia V. Iordanova¹,
Andrey P. Trifonov¹

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

✉ e-mail: otios@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to assess the potential of applying information technology, in particular mobile multifunction devices, as an additional type of control of harmful production factors in the field of labour protection.

Methods. One of the main techniques used in this study is an experiment involving laboratory measurements of the level of artificially created production noise using a mobile multifunction device (smartphone) with pre-installed utilities and a calibrated device – noise meter, and subsequent comparison of the results. The measurements were carried out in accordance with the methodological guidelines developed specially for mobile multifunction devices (MMFDs) by the authors.

Results. An analysis of the results obtained made it possible to assess the possibility of applying mobile multifunction devices in monitoring harmful factors in the work environment. While conducting the research, it was found that it is possible to use MMFDs in the occupational safety management system of the enterprise, since the deviations of the obtained values from the values of the calibrated noise meter adopted as the standard are insignificant. According to the results of the study, a flow diagram for the use of mobile multifunctional devices in occupational safety management systems of an enterprise was developed.

Conclusion. Thus, the use of MMFDs as an additional means of controlling the parameters of the production environment from the theoretical point of view is possible. It should be noted that in practice, application of MMFDs in the occupational safety management system will be challenging from legal and methodological viewpoints. The most basic problem is that MMFDs are not registered in the State Register of Measuring Equipment as measuring tools, which does not allow the official use of the data obtained. However, application of mobile multifunctional devices in the field of labour protection will ensure rapid collection of information on changes in indicators of harmful factors in the work environment, and as a result, will make it possible to quickly respond to these changes, which will significantly reduce the risk of accidents and occupational diseases.

Keywords: mobile multifunction devices; occupational safety management; harmful production factor; noise.

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

Funding: The work was carried out within the framework of the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MK-941.2019.5.

For citation: Popov V. M., Yushin V. V., A Iordanova. V., Trifonov A. P. Study of the Effectiveness of the Application of Information Technology in the Technosphere Safety Management System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 241-255 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-241-255>.

Received 09.10.2019

Accepted 27.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Концепция демографической политики Российской Федерации по обеспечению здоровья и безопасности граждан трудоспособного возраста направлена на сокращение уровня смертности и травматизма от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний за счет перехода в сфере охраны труда к управлению техносферной безопасностью [1-3].

Детальная проработка системы управления техносферной безопасностью является новым высокоэффективным компонентом системы обеспечения безопасных условий труда, поскольку позволяет осуществить переход от компенсационных выплат работнику за причиненный вред здоровью к профилактическим мероприятиям, направленным на снижение уровня травматизма и профессиональной заболеваемости [4, 5].

Тем не менее повсеместное внедрение процедуры управления техносферной безопасностью сопряжено с рядом методологических проблем, которые условно можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести проблемы, связанные с отсутствием постоянного мониторинга вредных факто-

ров. Ко второй группе можно отнести проблемы, связанные с необходимостью проведения инструментальных замеров уровней неблагоприятных факторов. Инструментальные замеры требуют наличия сложной, дорогостоящей аппаратуры, что вызывает затруднения в приобретении ее малыми предприятиями [6-9].

В соответствии с нормативной документацией специальная оценка условий труда, как правило, проводится 1 раз в 5 лет, а производственный контроль от 1 раза в 10 дней для вредных веществ 1 класса опасности в воздухе рабочей зоны, до 1 раза в 3 года для электромагнитных полей. Таким образом, остро встает вопрос о создании дополнительного метода контроля, который мог бы позволить осуществлять постоянный мониторинг вредных факторов, доступный при этом для всех видов производств.

Для решения этой проблемы можно использовать мобильные multifunctional устройства (ММФУ) – смартфоны, с помощью которых осуществлять измерение уровня вредных производственных факторов с последующим использованием полученных данных в системах управления техносферной безопасностью.

Век информационных технологий сделал ММФУ (телефоны, планшеты, смартфоны и т. п.) неотъемлемой составляющей нашей жизни. По сути, ММФУ представляет собой цифровое устройство, обладающее свойствами портативности (незначительными размерами) и высокой функциональностью. Дополнительный набор функций подразумевает использование специально разработанных утилит. Утилита – программа, относящаяся к широкой разновидности вспомогательных компонентов, входящих в состав общего программного обеспечения. Она предназначена для выполнения специальных типовых задач, связанных с работой ЭВМ (диагностика, управление памятью и т. д.) [10-13].

На сегодняшний день программные продукты, предлагаемые цифровым рынком для работы гаджетов, позволяют решить широкий спектр задач: от измерения количества пройденных шагов до уровня радиационного фона [14-18].

Таким образом, цель исследования состоит в оценке потенциала использования мобильных multifunctional устройств и соответствующих утилит в сфере охраны труда в качестве дополнительного вида контроля вредных производственных факторов на примере такого фактора, как шум.

Материалы и методы

Для достижения поставленной нами цели необходимо было решить определённые задачи.

В первую очередь необходимо было выбрать мобильное multifunctional

устройство для проведения опытных измерений. Таким устройством в нашем случае является обычный смартфон серии Sony Xperia Z1. Он обладает достаточными техническими характеристиками для проведения опытных исследований в данной области.

Следующей задачей являлся подбор соответствующих специализированных программных продуктов для измерения уровня шума.

В настоящее время в свободном доступе имеется огромное количество всевозможных утилит. Нами были выделены определенные характеристики, по которым происходит выбор программных продуктов для измерения уровня шума. К таким характеристикам относятся: доступность, универсальность, возможность калибровки, возможность сохранения результатов измерения, наличие регулярных обновлений и т.п.

В соответствии с перечисленными характеристиками были выбраны следующие виды утилит:

- Sound Meter;
- Decibel X PRO;
- iNVH;
- Шумомер: Sound Meter;
- Децибельный счетчик.

Каждая из выбранных утилит имеет свои отличительные особенности, достоинства и недостатки. Сравнительный анализ данных программных продуктов представлен в табл. 1.

В процессе эксперимента измерения проводились с каждой из перечисленных в таблице утилит.

Таблица 1. Анализ утилит для измерения уровня шума**Table 1.** Analysis of utilities to measure the level of noise

Название утилит/ Utilities name	Характеристики / Characteristics				
	Доступность/ Availability	Возможность калибровки/ Possibility of calibration	Универсальность/ Universality	Сохранение результатов/ Saving results	Наличие обновлений ПО/ Availability of software updates
Sound Meter	+	+	—	+	+
Decibel X PRO	—	+	—	+	—
iNVH	+	+	—	—	—
Шумомер: Sound Meter	+	+	—	+	+
Децибелный счетчик	+	—	—	—	—

Далее, для того, чтобы осуществлять анализ результатов, необходимо было сравнить значения, полученные в ходе измерения уровня шума смартфоном с использованием соответствующей утилиты, с некими эталонными значениями. За эталонные принимались значения, полученные в процессе измерения откалиброванным шумомером TESTO 615.

Таким образом, в процессе исследования применялись следующие устройства и программные продукты: шумомер TESTO 615, смартфон Sony Xperia Z1, утилита «Децибелный счетчик», утилита «Шумомер: Sound Meter», утилита «Decibel X PRO», утилита «Sound Meter», утилита «iNVH».

Измерения шумомером проводились в соответствии с утвержденными методическими указаниями в лабораторных условиях с созданием искусственных шумов. Так как методические указания для инструментального кон-

троля уровня производственного шума не подходят для его измерения с помощью ММФУ, ввиду специфических технических характеристик последних, нами была разработана ориентированная под ММФУ методика.

Для детальной локализации измерений параметров шума мы ввели 4 диапазона: от 20 до 40, от 40 до 60, от 60 до 80, от 80 до 100 дБ. Ограничения в 100 дБ связано с тем, что устройство микрофона большинства ММФУ ориентировано, в основном, на восприятие человеческого голоса, а шум свыше 98 дБ гасится программным обеспечением устройства.

Порядок проведения измерений следующий:

1) при помощи искусственного источника шума (его использование обосновывается идентичными условиями проведения экспериментов) мы создали шум в ранее обозначенном нами диапазоне, затем проверили его при помощи

откалиброванного шумомера, получив определенный результат;

2) далее измерили данный шум при помощи гаджета и специализированных утилит. При измерении провели калибровку полученных показаний с показаниями шумомера при помощи функционала программных продуктов;

3) затем измерили величину шума в следующем контрольном диапазоне, предварительно создав его при помощи источника искусственного шума, но при этом оставили калибровочные значения предыдущего диапазона. Таким образом проводим измерения всеми утилитами на выбранных нами величинах;

4) дальнейшие измерения отличались от вышеперечисленных сменой калибровочного диапазона и сменой утилит.

Данное исследование проводилось нами для того, чтобы понять, насколько достоверны показания, получаемые при

помощи мобильного многофункционального устройства.

Кроме того, параллельно проводились измерения при помощи утилиты без функционала калибровки, чтобы выявить влияние этой функции на получаемые значения. Подобные измерения проводились регулярно, с периодичностью раз в два дня на протяжении двух месяцев.

Последним этапом нашего опыта стало проведение аналогичного эксперимента с применением тех же самых шумов и калибровочных величин спустя два месяца после калибровки.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований были обобщены и сведены в соответствующие таблицы. В табл. 2-4 представлены средние значения уровня шума в течение первого месяца исследования по выбранным диапазонам.

Таблица 2. Результаты измерений, при калибровке утилит на диапазоне 40-60 дБ

Table 2. Measurement results, when calibrating utilities in the range of 40-60 dB

Уровень шума/ Noise level	Шумомер (прибор, эталонное значение, к которому калибруются утилиты)/ Sound level meter (instrument, reference value to which utilities are calibrated)	Децибел-ный счетчик (утилита без калибровки)/ (utility without the calibration)	Шумомер Sound Meter (утилита)/ (utility)	Decibel X PRO (утилита) / (utility)	Sound Meter (утилита) / (utility)	iNVH (утилита) / (utility)
20-40 дБ	36	27	41	32	34	32
40-60 дБ	52	45	52	52	52	52
60-80 дБ	68	60	63	61	60	61
80-100 дБ	85	73	71	69	68	66

Таблица 3. Результаты измерений, при калибровке утилит на диапазоне 60-80 дБ**Table 3.** Measurement results, when calibrating utilities are in the range of 60-80 dB

Уровень шума/ Noise level	Шумомер (прибор, эталонное значение, к которому калибруются утилиты)/ Sound level meter (instrument, reference value to which utilities are calibrated)	Децибел- ный счет- чик (ути- лита без калибров- ки)/ (utility without the calibration)	Шумомер Sound Me- ter (утили- та)/ (utility)	Decibel X PRO (утилита) / (utility)	Sound Me- ter (утили- та)/ (utility)	iNVH (утили- та)/ (utility)
20-40 дБ	36	27	45	47	49	46
40-60 дБ	52	45	57	54	58	60
60-80 дБ	68	60	68	68	68	68
80-100 дБ	85	73	75	71	73	70

Таблица 4. Результаты измерений, при калибровке утилит на диапазоне 80-100 дБ**Table 4.** Measurement results, when calibrating utilities are in the range of 80-100 dB

Уровень шума/ Noise level	Шумомер (прибор, эталонное значение, к которому калибруются утилиты)/ Sound level meter (instrument, reference value to which utilities are calibrated)	Децибел- ный счет- чик (ути- лита без калибров- ки) / (utility without the calibra- tion)	Шумомер Sound Me- ter (утили- та)/ (utility)	Decibel X PRO (утилита) / (utility)	Sound Me- ter (утили- та)/ (utility)	iNVH (утили- та)/ (utility)
20-40 дБ	36	27	52	56	58	55
40-60 дБ	52	45	62	61	67	65
60-80 дБ	68	60	73	74	75	78
80-100 дБ	85	73	85	85	85	85

В ходе проведения эксперимента было выявлено следующее:

- для получения наиболее достоверных результатов необходимо проводить калибровку утилит, посредством откалиброванного профессионального шумомера;

- чем больше разница между диапазоном, к которому была совершена калибровка, и измеряемому уровню шума, тем существеннее погрешность проводимых измерений;

- по истечении одного месяца, расхождение результатов измерений было незначительно, поэтому эксперимент был продлен еще на один месяц.

Проанализировав показания утилит, полученных в течение месяца после первого опыта, было установлено:

– результаты, полученные в ходе эксперимента по прошествии месяца после калибровки утилит, отличаются менее, чем на 3 дБ от изначального результата, что можно отнести к допустимой погрешности;

– для определения времени, по истечении которого необходимо проводить повторную калибровку утилит, повторный эксперимент был проведен еще на протяжении месяца.

Усредненные результаты проведенных измерений уровня шума на протяжении второго месяца после калибровки представлены в табл. 5-7.

Таблица 5. Результаты измерений, при калибровке утилит на диапазоне 40-60 дБ

Table 5. Measurement results, when calibrating utilities are in the range of 40-60 dB

Уровень шума/ Noise level	Шумомер (прибор, эталонное значение, к которому калибруются утилиты)/ Sound level meter (instrument, reference value to which utilities are calibrated)	Децибел-ный счетчик (утилиты без калибровки)/ (utility without the calibration)	Шумомер Sound Meter (утилиты)/ (utility)	Decibel X PRO (утилиты)/ (utility)	Sound Meter (утилиты)/ (utility)	iNVH (утилиты)/ (utility)
20-40 дБ	36	24	38	38	36	39
40-60 дБ	52	43	52	52	52	52
60-80 дБ	68	62	63	61	60	59
80-100 дБ	85	75	66	65	67	65

Таблица 6. Результаты измерений, при калибровке утилит на диапазоне 60-80 дБ

Table 6. Measurement results, when calibrating utilities are in the range of 60-80 dB

Уровень шума/ Noise level	Шумомер (прибор, эталонное значение, к которому калибруются утилиты)/ Sound level meter (instrument, reference value to which utilities are calibrated)	Децибел-ный счетчик (утилиты без калибровки)/ (utility without the calibration)	Шумомер Sound Meter (утилиты)/ (utility)	Decibel X PRO (утилиты)/ (utility)	Sound Meter (утилиты)/ (utility)	iNVH (утилиты)/ (utility)
20-40 дБ	36	24	45	46	50	45
40-60 дБ	52	43	57	54	58	60
60-80 дБ	68	62	68	68	68	58
80-100 дБ	85	75	78	73	75	71

Таблица 7. Результаты измерений, при калибровке утилит на диапазоне 80-100 дБ**Table 7.** Measurement results, when calibrating utilities are in the range of 80-100 dB

Уровень шума/ Noise level	Шумомер (прибор, эталонное значение, к которому калибруются утилиты)/ Sound level meter (instrument, reference value to which utilities are calibrated)	Децибелный счетчик (утилиты без калибровки) / (utility without the calibration)	Шумомер Sound Meter (утилиты)/ (utility)	Decibel X PRO (утилиты) / (utility)	Sound Meter (утилиты)/ (utility)	iNVH (утилиты)/ (utility)
20-40 дБ	36	24	52	54	56	57
40-60 дБ	52	43	64	61	68	65
60-80 дБ	68	62	76	73	78	76
80-100 дБ	85	75	85	85	85	85

Проанализировав показания утилит спустя два месяца после первого опыта, было установлено, что для увеличения точности получаемых результатов посредством специальных приложений, рекомендуется проводить повторную калибровку не реже, чем один раз в два месяца, так как результаты, полученные в ходе эксперимента по прошествии двух месяцев после калибровки утилит, отличаются более, чем на 4 дБ от начального результата, что уже является существенным отклонением.

Выводы

В результате проведенных исследований было выявлено, что применение мобильных multifunctional устройств в качестве дополнительного метода контроля параметров производственной среды с теоретической точки зрения возможно. При проведении измерений была разработана инструкция по применению ММФУ для контроля

уровня производственного шума, в основу которой легли методические указания для инструментального контроля уровня производственного шума.

Кроме того, в соответствии с разработанной методикой измерения с помощью мобильных multifunctional устройств и соответствующих программных продуктов была разработана схема контроля норм и параметров условий труда с применением ММФУ, представленная на рис.

Следует отметить, что на практике применение ММФУ в системе управления охраной труда столкнется с рядом юридических и методологических проблем.

Самая основная проблема заключается в том, что ни одно мобильное multifunctional устройство не внесено в государственный реестр средств измерений, что не позволяет официально использовать полученные данные.

Однако применение ММФУ в сфере охраны труда обеспечит оперативный сбор информации об изменении показателей вредных факторов производственной среды, и как следствие,

позволит быстро отреагировать на данные изменения, что существенно снизит риск возникновения несчастных случаев и профессиональных заболеваний [19-20].

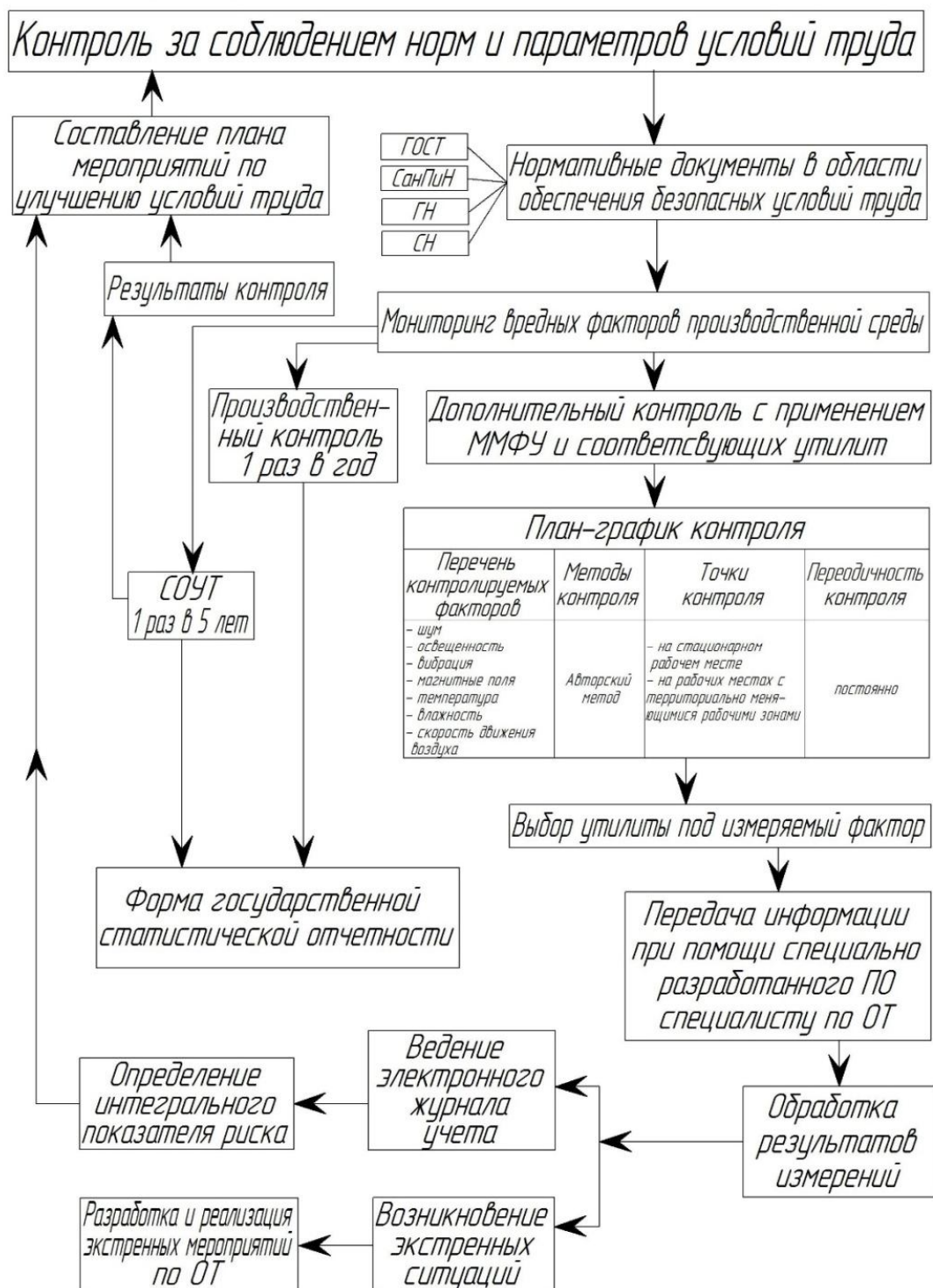


Рис. Принципиальная схема контроля норм и параметров условий труда с применением ММФУ

Fig. Schematic diagram for controlling norms and parameters of working conditions using MMFD

Список литературы

1. Пушенко С.Л., Вейсенберг И.В., Волкова Н.Ю. Управление охраной труда с помощью информационных технологий // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 358-360.
2. Булычев С.Н., Горбачев С.И. Информационные технологии в сфере управления охраной труда // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2014. № 4 (124). С. 11-15.
3. Костин Д.М., Севастьянов Б.В. Применение информационных технологий в системах управления охраной труда: опыт российских нефтегазовых предприятий // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. Ижевск, 2016. С. 541-546.
4. Кирильчук И.О., Рыкунова В.Л. Оценка и управление риском здоровью в системе эколого-экономической безопасности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 2 (59). С. 93-97.
5. Совершенствование метода и алгоритма построения системы управления риском возникновения профессиональных заболеваний / А. Н. Барков, Л. В. Шульга, В. Н. Снопков [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. №1(58). С. 65–74.
6. Протасов В.В., Юшин В.В., Попов В.М. Осуществление процесса управления охраной труда на предприятии // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей II международной научно-практической конференции. Курск, 2010. С. 298-302.
7. Соловьев А.И. Применение информационных технологий в области охраны труда и промышленной безопасности // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 33. С. 201-205.
8. Проблемы техносферной безопасности в наноиндустрии / Л.В. Шульга, В.В. Юшин, В.В. Протасов, А.Н. Барков // Физика и технология наноматериалов и структур материалы: Международной научно-практической конференции. Курск, 2013. С. 69-72.
9. Графкина М.В., Свиридова Е.Ю., Королев В.И. Информационные технологии в анализе и прогнозировании производственного травматизма // Экономика труда. 2019. Т. 6. № 2. С. 913-922.
10. Правовые и методические основы управления профессиональными рисками / Э.И. Денисов, Л.В. Прокопенко, И.В. Степанян, П.В. Чесалин // Медицина труда и промышленная экология. 2011. № 12. С. 6-11.
11. Федотова Н.Г., Баров А.М. Совершенствование деятельности отдела охраны труда средствами информационных технологий // Аллея науки. 2017. Т. 2. № 8. С. 505-517.

12. Ульянов А.И. Внедрение информационных технологий в процессы управления охраной труда // Процессы глобальной экономики: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. СПб., 2017. С. 147-149.
13. Юшин В.В., Преликова Е.А. Роль информационных технологий в обеспечении экологической безопасности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 67-74.
14. Юшин В.В., Иорданов А.А. Современные гаджеты как средства контроля жилой среды человека // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей международной научно-практической конференции. Курск, 2017. 135 с.
15. Юшин В.В., Камардин М.А. Перспективы использования гаджетов в оценке и управлении профессиональным риском // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 3 (20). С. 80-86.
16. Юшин В.В., Попов В.М., Макушкин В.П. Проблемы оценки профессиональных рисков в России // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2-2. С. 217-221.
17. Камардин М.А., Юшин В.В. Общая характеристика этапов, основ разработки методов оценки профессиональных рисков на производстве // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей V Международной научно-практической конференции. Курск, 2013. С. 243-346.
18. Козионов С.В. Назначение информационных технологий в области безопасности жизнедеятельности // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 273-276.
19. Юшин В.В., Камардин М.А. Проблемы оценки профессиональных рисков на основе специальной оценки условий труда // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 1 (58). С. 75-81.
20. Попов В.М., Юшин В.В., Камардин М.А. Анализ методов, схем оценки профессиональных рисков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 173-177.

References

1. Pushenko S. L., Weissenberg I. V., Volkova N. Yu. Upravlenie ohranoj truda s pomoshch'yu informacionnyh tekhnologij [Management of labor protection with the help of information technologies]. *Nauchnoe obozrenie = Scientific review*, 2013, no. 9, pp. 358-360 (In Russ.).
2. Bulychiev S. N., Gorbachev S. I. Informacionnye tekhnologii v sfere upravleniya ohranoj truda [Information technologies in the sphere of labor protection management]. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense complex-scientific and technical progress of Russia*, 2014, no. 4 (124), pp. 11-15 (In Russ.).

3. Kostin D. M., Sevastyanov B. V. *Primenenie informacionnyh tekhnologij v sistemah upravleniya ohranoj truda: opyt rossijskih neftegazovyh predpriyatij* [Application of information technologies in occupational safety management systems: experience of Russian oil and gas enterprises]. *Sbornik materialov IV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii aspirantov, magistrantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem "Molodye uchenye – uskoreniyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke"* [Proceedings of the IV all-Russian scientific and technical conference of postgraduates, undergraduates and young scientists with international participation "Young scientists-acceleration of scientific and technical progress in the XXI century"]. Izhvsk, 2016, pp. 541-546 (In Russ.).

4. Kirilchuk I. O. , Rykunova V. L. *Ocenka i upravlenie riskom zdorovyu v sisteme ekologo-ekonomicheskoi bezopasnosti* [Assessment and management of health risk in the system of ecological and economic security]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 2 (59), pp. 93-97 (In Russ.).

5. Barkov A. N., Shulga L. V., Snopkov V. N. [et al.]. *Sovershenstvovanie metoda i algoritma postroeniya sistemi upravleniya riskom vzniknoveniya professionalnih zabolevanii* [Improvement of the method and algorithm for constructing a risk management system for occupational diseases]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 1 (58), pp. 65-74 (In Russ.).

6. Protasov V. V., Yushin V. V., Popov V. M. *Osuschestvlenie processa upravleniya ohranoi truda na predpriyatii* [Implementation of the process of labor protection management at the enterprise]. *Sbornik statei II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda"* [Collection of articles of the II international scientific and practical conference "Actual problems of ecology and labor protection"]. Kursk, 2010, pp. 298-302 (In Russ.).

7. Soloviev A. I. *Primenenie informacionnyh tekhnologij v oblasti ohrany truda i promyshlennoj bezopasnosti* [Application of information technologies in the field of labor protection and industrial safety]. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii = Prospects of development of information technologies*, 2016, no. 33. pp. 201-205 (In Russ.).

8. Shulga L. V., Yushin V. V., Protasov V. V., Barkov A. N. *Problemi tehnosfernoi bezopasnosti v nanoindustrii* [Problems of technosphere safety in nanoindustry]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur materialy"* [Collection of the materials of International scientific-practical conference "Physics and technology of nanomaterials and structures"]. Kursk, Southwest State University Publ., 2013, pp. 69-72 (In Russ.).

9. Grafkina M. V., Sviridova E. Yu., Korolev V. I. *Informacionnye tekhnologii v analize i prognozirovanii proizvodstvennogo travmatizma* [Information technologies in the analysis and forecasting of industrial injuries]. *Ekonomika truda = labor Economics*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 913-922 (In Russ.).

10. Denisov E. I., Prokopenko L. V., Stepanyan I. V., Chesalin P. V. Pravovye i metodicheskie osnovy upravleniya professional'nymi riskami [Legal and methodological foundations of professional risk management]. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = *Medicine of labor and industrial ecology*, 2011, no. 12, pp. 6-11 (In Russ.).

11. Fedotova N. G., Bars A. M. Sovershenstvovanie deyatel'nosti otdela ohrany truda sredstvami informacionnykh tekhnologij [Improvement activities of the Department of labor protection by means of information technology]. *Alleya nauki* = *Walk of Science*, 2017, vol. 2, no. 8, pp. 505-517 (In Russ.).

12. Ulyanov A. I. Vnedrenie informacionnykh tekhnologij v processy upravleniya ohranoj truda [Introduction of information technologies in processes of labor protection management]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Protsessy global'noi ekonomiki"* [Collection of scientific papers of the International scientific-practical conference "Processes of global economy"]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 147-149 (In Russ.).

13. Yushin V. V., Prelikova, E. A. Rol informacionnih tehnologii v obespechenii ekologicheskoi bezopasnosti [The role of information technologies in ensuring environmental safety]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 4 (21), pp. 67-74 (In Russ.).

14. Yushin V. V., Iordanov A. A. Sovremennye gadjeti kak sredstva kontrolya jiloi sredi cheloveka [Modern gadgets as a means of controlling the human living environment]. *Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda"* [Collection of articles of the international scientific and practical conference "Actual problems of ecology and labor protection"]. Kursk, 2017, 135 p. (In Russ.).

15. Yushin V. V., Kamardin M. A. Perspektivi ispolzovaniya gadjetov v ocenke i upravlenii professionalnim riskom [Prospects for the use of gadgets in the assessment and management of occupational risk]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 3 (20), pp. 80-86 (In Russ.).

16. Yushin V. V., Popov V. M., Makushkin V. P. Problemi ocenki professionalnih riskov v Rossii [Problems of professional risk assessment in Russia]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2-2, pp. 217-221 (In Russ.).

17. Kamardin M.A. , Yushin V. V. Obschaya harakteristika etapov, osnov razrabotki metodov ocenki professionalnih riskov na proizvodstve [General characteristics of stages, bases of development of methods of assessment of occupational risks in production]. *Sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda"* [Collection of articles of the V International scientific-practical conference "Actual problems of ecology and labor protection"]. Kursk, 2013, pp. 243-346 (In Russ.).

18. Kozionov S. V. Naznachenie informacionnyh tekhnologij v oblasti bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti [Appointment of information technologies in the field of life safety]. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstvii chrezvychainykh situatsii = Problems of Safety in Liquidation of Consequences of Emergencies*, 2018, vol. 1, pp. 273-276 (In Russ.).

19. Yushin V. V., Kamardin M.A. Problemi ocenki professionalnih riskov na osnove specialnoi ocenki uslovii truda [Problems of professional risk assessment on the basis of special assessment of working conditions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 1 (58), pp. 75-81 (In Russ.).

20. Popov V.M. , Yushin V.V., Kamardin M.A. Analiz metodov, shem ocenki professionalnih riskov [Analysis of methods, schemes of professional risk assessment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 173-177 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Попов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Victor M. Popov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Labour and Environment Protection, Honoured Worker of Higher Education of the Russian Federation, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru

Юшин Василий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Vasily V. Yushin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Labour and Environment Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru

Иорданова Анастасия Владимировна, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

Anastasia V. Iordanova, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7780-497X>

Трифонов Андрей Павлович, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: andreyka.trifonov.2020@mail.ru

Andrey P. Trifonov, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: andreyka.trifonov.2020@mail.ru

Оптимизация аналого-дискретных преобразований входного воздействия в подсистеме приемного канала информационно-измерительной системы

А. А. Бурмака¹, Т. Н. Говорухина¹ ✉, Р. Ю. Горяйнов¹

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

✉ e-mail: govtn@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка методики построения системной и локальных моделей целенаправленных процессов функционирования подсистемы приемного канала информационно-измерительной системы. Данные модели должны позволить обосновать возможность оптимизации процессов взаимодействия компонентов аналого-дискретного преобразования входного воздействия случайного характера.

Методы. Методика получения измерительной информации в информационно-измерительной системе предполагает использование алгоритмов, минимизирующих информационные потери на каждом этапе преобразования входного воздействия. Возможным подходом является применение рациональных и оптимальных решений при выборе и обосновании функционального обеспечения преобразования входного воздействия $\xi(t, \lambda, S)$ с целью получения текущей измерительной информации при минимизации остаточной неопределенности.

Результаты. Для решения поставленной задачи необходимо: построить системную модель для совокупности основных функций, определяющих реализацию целенаправленного процесса аналого-дискретного преобразования $\xi(t, \lambda, S)$; обосновать способ реализации этих функций, критерии их взаимодействия; определить методику оптимизации и (или) рациональных построений локальных целенаправленных процессов; сформировать методические рекомендации и правила структурных построений подсистемы информационно-измерительной системы, входные воздействия которой с априори неизвестными характеристиками. В работе предлагается методический подход к функциональной организации аналого-дискретных преобразований входного воздействия случайного характера в подсистеме приемного канала информационно-измерительной системы, позволяющий путем оптимизации взаимосвязанных целенаправленных процессов обнаружения импульсных сигналов и измерения их параметров на фоне помех с неизвестными априори характеристиками повысить качество функционирования приемного канала информационно-измерительной системы и работы её компонентов.

Заключение. Применение процедур временной селекции сигналов, управляемой каналом обнаружения, позволяет повысить скорость и точность определения их параметров, повысить помехоустойчивость подсистемы приемного канала информационно-измерительной системы, снизить вероятность пропуска слабых сигналов, а также повысить точность измерения временных параметров импульсных сигналов.

Ключевые слова: аналого-дискретное преобразование; параметры импульсных сигналов; селекция импульсов на фоне помех; управление частотно-временными характеристиками; прием случайных сигналов.

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

Для цитирования: Бурмака А. А., Говорухина Т. Н., Горайнов Р. Ю. Оптимизация аналого-дискретных преобразований входного воздействия в подсистеме приемного канала информационно-измерительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 256-270. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-256-270>.

Поступила в редакцию 16.10.2019

Подписана в печать 29.11.2019

Опубликована 23.2.2019

Optimization of Analog-Discrete Conversions of the Input Action in the Subsystem of the Receiving Channel of the Information-Measuring System

Alexander A. Burmaka¹, Tatyana N. Govorukhina¹ ✉, Roman Y. Goryainov¹

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

✉ e-mail: govtn@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a technique for developing system and local models of targeted processes of functioning of the subsystem of the receiving channel of an information-measuring system. These models should make it possible to substantiate the possibility of optimizing the processes of interaction of the components of the analog-discrete conversion of the input action of a random nature.

Methods. The technique for obtaining measurement information in the information-measuring system involves the use of algorithms that minimize information loss at each stage of conversion of the input action. A possible approach is the use of rational and optimal solutions when selecting and substantiating functional support of the input action $\xi(t, \lambda, S)$ in order to obtain current measurement information while minimizing residual uncertainty.

Results. To solve this problem, it is necessary to build a system model for the totality of the basic functions that determine the implementation of the targeted process of analog-discrete conversion $\xi(t, \lambda, S)$; to substantiate the way these functions are implemented, the criteria for their interaction; to determine the optimization technique and (or) rational construction of local targeted processes; to prepare guidelines and rules for structural constructions of the subsystem of the information-measuring system, the input actions of which have priori unknown characteristics. The paper proposes an approach to the functional organization of analog-discrete conversions of the input action of a random nature in the receiving channel subsystem of an information-measuring system, which allows improving the quality of the receiving channel of the information-measuring system and the operation of its components by optimizing the interrelated targeted processes for detecting pulse signals and measuring their parameters against the background of noise with a priori unknown characteristics.

Conclusion. The application of procedures for temporary selection of signals controlled by the detection channel allows increasing the speed and accuracy of determining their parameters, increasing the noise immunity of the receiving channel subsystem of the information-measuring system, reducing the probability of skipping weak signals as well as increasing the accuracy of measuring the temporal parameters of pulse signals.

Keywords: analog-discrete conversion; pulse signals parameters; pulse selection against interference; time-frequency response management; random signal reception.

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

For citation: Burmaka A. A., Govorukhina T. N., Goryainov R. Y. Optimization of Analog-Discrete Conversions of the Input Action in the Subsystem of the Receiving Channel of the Information-Measuring System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 256-270 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-256-270>.

Received 16.10.2019

Accepted 29.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Декомпозиция целевой функции (ЦФ) информационно-измерительной системы (ИИС) предполагает формирование дерева функций [1] (основных и дополнительных), одной из определяющих ветвей которого является подмножество функций $\{\Phi_{ad}\}$, направленных на реализацию процессов восприятия системой входного воздействия и преобразование его к виду, удобному для получения (добывания) текущей измерительной информации. Основными функциями этого подмножества являются:

- обнаружение сигналов в приемном канале ИИС на фоне шумовых и импульсных помех в процессе получения информации опытным путем (оператор E_H);
- фильтрация сигналов и помех на входе приемного канала ИИС (оператор E_f);
- аналогово-дискретное преобразование сигналов в виду, удобному для последующего цифрового представления и формирования измерительной информации (оператор E_{ad}).

Исходя из положения об определяющей роли основных функций, лежащих в основе перечисленных преобразований в приемном канале ИИС, формируется целенаправленный процесс

(ЦНП [2, 3]) как совокупность рациональных приемов перехода от функции к структуре [1]. Определяющим фактором является построение аналитических моделей рассматриваемой ветви ЦФ и их алгоритмическая интерпретация согласно направленным действиям E_H, E_f, E_{ad} .

Параллельно с этим возникает задача оптимизации взаимодействия основного и локальных алгоритмов реализации ЦНП аналого-дискретного преобразования входного воздействия ИИС.

Цель работы: разработка методики построения системной и локальных моделей целенаправленных процессов функционирования подсистемы приемного канала ИИС, позволяющих обосновать возможность оптимизации процессов взаимодействия компонентов аналого-дискретного преобразования входного воздействия случайного характера.

Материалы и методы

Приемный канал ИИС (безотносительно к детализации его свойств и принципов построения) является подсистемой получения информации от исследуемого объекта в виде полезных сигналов в смеси с аддитивными шумовыми и импульсными помехами, представляющих для подсистемы входное воздействие.

Это воздействие характеризуется:

- частотным диапазоном;
- полосой частот ΔF принимаемых электрических колебаний;
- структурой и интенсивностью входного потока $\lambda(A)$, т.е. [4, 5]

$$\lambda(A) = \sum_{r=1}^R \lambda_r(A)$$

где

$$\lambda_r(A) = \int_{V_{ra}} P_{or} \cdot \lambda_{ir}(a) \cdot P(A^*/a) P_i^r(a) da; \quad (1)$$

$$r = \overline{1, R},$$

здесь A – вектор наблюдаемых параметров $\{a\}$, результат измерения «а»; V_{ra} – область параметрического пространства наблюдений r -го объекта в канале с полосой ΔF ; P_{or} – вероятность пропуска наблюдений r -го объекта; $\lambda_{ir}(a)$ – среднее количество полезных сигналов S_{ir} для временной компоненты t_{ir} [5], такой что $t_{ir} = (t_i + \Delta t_i)_r$, поступающих на вход приемного канала ИИС; $P(A^*/a)$ – условная плотность вероятности распределения компонент вектора наблюдаемого множества $\{a\}$; A^* – вектор компонент наблюдения, мешающих по отношению к вектору A ; $P_i^r(a)$ – вероятность наблюдения i -го сигнала от r -го объекта в момент времени t_{ir} на интервале $(t_i + \Delta t_i)_r$;

- мощностью (или амплитудой) наблюдаемых полезных сигналов S_{ir} ;
- формой сигналов и их огибающей (если сигнал поступает в виде серий (пачек) модулированных по амплитуде);

– характеристиками помех в виде аддитивной смеси шума и неинформативных (мешающих) сигналов.

Сам факт приема входного воздействия подсистемой ИИС может быть описан в виде аналитической модели как $\xi_r^{(j)}(t, \lambda, S) = E_J[S_{ir}(t - t_i, \lambda_r, a), \vec{n}(t)]$, (2) где $r = \overline{1, R}$ порядковый номер реализации r -го входного воздействия в j -ом сеансе работы ИИС, $i = \overline{1, \lambda}$ – i -тый сигнал $S(t - t_i)$ во входном воздействии, $k = \overline{1, m}$ – k -тый параметр сигнала, такой что, $a_k^{(i)} \in A$; E_J – оператор информационного преобразования при приеме входного воздействия; $\vec{n}(t)$ – вектор возмущений, характеризующий мешающие компоненты входного воздействия аддитивного характера; $S_{ir}(t - t_i, \lambda_r, a)$ – поток сигналов, ограниченный длительностью $T_{r \max}$ r -ой реализации, обнаруженных приемным каналом.

При этом S определяется как пространство аналоговых импульсных сигналов мощности P_c (или амплитуды U_c), формы, длительности, с интервалами следования T_H при априорной неопределенности значений и пределов изменения этих параметров и характеристик. В общем виде аналитическая модель $S_{ir}(t - t_i, \lambda_r, a)$ может быть представлена как [6]

$$S_{ir}(t - t_i, \lambda_r, a) = \sum_{i=1}^{\infty} \psi(t - t_i) \approx$$

$$\approx U_{C_o} \cdot \frac{\tau_H}{T_H} [1 + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cdot \cos i \cdot \omega_0 t], \quad (3)$$

$$\text{где } C_i = \frac{2 \sin(i \cdot \omega_0 \frac{\tau_H}{2})}{i \cdot \omega_0 \frac{\tau_H}{2}}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_H}; \quad \tau_H -$$

длительность импульса на заданном уровне; T_H – период (интервал) следования импульсов, i – номер гармоники.

В этом случае комплексное воздействие как $\xi(t, \lambda, S)$ на входные цепи приемного канала ИИС может быть представлено как произвольная комбинация полезных сигналов $S(t, \lambda, a)$ и помех $\vec{n}(t)$, т.е. a как r -тая реализация входного воздействия (от r -го объекта)

$$\xi_{ir}^{(j)}(T_{H_{\max}}^{(r)}) = \{[S_{ir}(t - t_i), \lambda_r, \{a_k\}] \times \vec{n}(t)\},$$

$$\text{здесь } \sum_{i=1}^1 (t_i + \Delta t_i)_r = T_{H_{\max}}^{(r)};$$

$$\Delta t_i = \tau_{H_i} + \tau_{k_{i,i+1}},$$

где $\tau_{k_{i,i+1}}$ – интервал между соседними импульсами последовательности; $T_{H_{\max}}^{(r)}$ – априорная длительность (в общем случае – управляемая) r -той реализации входного воздействия.

Аналитическая модель (1), описывающая верхний уровень наблюдения, дополнительно определяется:

- структурой каждого из видов импульсного сигнала и выражением (например, (2)), его описывающим;
- количеством функционирующих объектов как источников сигнала;
- вероятностными и параметрическими характеристиками источников сигналов, составляющих внешнюю анализируемую среду;
- характеристиками и свойствами помех.

При этом предполагается, что в общем виде отношение сигнал – шум

$$q_{сш} = \frac{P_C}{\sigma_{ш}^2} > 1,$$

где $\sigma_{ш}^2$ – дисперсия (мощность) шумовой помехи $n(t)$ в канале, т.е.

$$\sigma_{ш}^2 = P_{ш} = N_0 \cdot \Delta F,$$

N_0 – спектральная плотность шума.

Методика получения измерительной информации в ИИС, доставляемой входным воздействием $\xi(t, \lambda, S)$, предполагает использование алгоритмов, минимизирующих информационные потери на каждом из этапов преобразования входного воздействия [1, 7, 8]. Одним из подходов является применение рациональных и оптимальных решений при выборе и обосновании функционального обеспечения преобразования входного воздействия $\xi(t, \lambda, S)$ с целью получения текущей измерительной информации при минимизации остаточной неопределенности.

Результаты и их обсуждение

Для решения поставленной задачи в соответствии с целью необходимо:

- построить системную модель для совокупности основных функций, определяющих реализацию целенаправленного процесса аналого-дискретного преобразования $\xi(t, \lambda, S)$;
- обосновать способ реализации этих функций, критерии (правила) их взаимодействия;
- определить методику оптимизации и (или) рациональных построений [1] локальных ЦНП [3];

– сформировать методические рекомендации и правила структурных построений подсистемы ИИС, входные воздействия которой с априори неизвестными характеристиками.

Аналого-дискретное преобразование входного воздействия $\xi(t, \lambda, S)$ в подсистеме ИИС (её приемном канале) обуславливается:

1) необходимостью согласования характеристик приемного канала с пространственными и частотно-временными свойствами внешней среды;

2) простотой реализации аналоговых процедур обнаружения (оператор E_H) и выделения информативных сигналов в реальном масштабе времени из смеси $\xi(t, \lambda, S)$;

3) алгоритмизацией в аналого-дискретном базисе (параллельно с обнаружением) преобразования сигналов [6, 12] в процессе получения информации о значениях их параметров;

4) простотой согласования ЦНП аналогового типа с процессами аналого-цифрового преобразования (АЦП) сигналов. Здесь АЦП – связующий элемент в части аппаратного и программного ресурсов ИИС, где реализуются процедуры дискретизации сигнала по времени и квантования по уровню. В этом случае необходимо учитывать, что из-за нелинейности таких преобразований возникают сложности [7, 9, 10] в непосредственном подключении АЦП ко входу приемного канала ИИС, что является важным фактором, обуславливающим реализацию ряда аналого-дискретных направленных действий,

предшествующих процедуре АЦП [10]. При этом предполагается, что ΔF приемного канала (подсистемы) ИИС много больше полосы ΔF_C принимаемого сигнала $S_{ir}(t-t_i, \lambda_r, a)$, что учитывается системной моделью, объединяющей совокупности основных функций временной и энергетической ветвей дерева ЦФ. В соответствии с этим системная модель как вложение локальных функциональных субмоделей, приведена на рис. 1 и интерпретирует этапы аналогового и аналого-дискретного [10] первичных преобразований входного воздействия $\xi(t, \lambda, S)$ с априори неизвестными характеристиками.

Здесь τ_z – длительность задержки сигнала S_i , τ_ϕ – длительность фронта импульса S_i ; $f_r(\tau_c)$ – команда, фиксирующая результат измерения амплитуды импульсов в r -ой реализации по импульсу спада τ_c ; S_n – нормированный импульс по уровню и амплитуде, $f_1(\cdot)$ и $f_2(\cdot)$ – дифференцируемая функция, $\hat{\tau}_H$, $\hat{T}_H$, $\hat{T}_c$, $\hat{\tau}_k$ – цифровое представление параметров; Δt_z , ΔU_z – образцовые (эталонные) измерительные величины; N_1 , N_2 , N_3 , N_4 – числовые значения параметров; E_{za} – оператор задержки аналогового воздействия; E_{ad} – аналого-дискретное преобразование сигналов $S(t_i, \lambda, a)$ [10]; E_{df} – дифференцирование функций входного воздействия и нормированных сигналов; $E_{ца}$ – цифро-аналоговое преобразование; $E_{ац}$ – анало-

го-цифровое преобразование; E_{as} – временная селекция (стробирование) сигналов $S(t_i, \lambda, a)$ из смеси $\xi(t, \lambda, S)$; E_{up} – нормирование импульсных сигналов по длительности и амплитуде на заданном уровне; $E_{цв}$, $E_{цэ}$ – соответственно цифровое представление временных и энергетических параметров сигналов; $E_{\gamma в}$, $E_{\gamma э}$ – соответственно принятие решения о текущей оценке результата измерения временных и энергетических величин; E_a – аналоговое преобразование (усиление, ослабление, ограничение); E_H – обнаружение сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками; E_f – фильтрация или режекция сигналов и помех в заданной полосе ΔF_C .

При априори неизвестных параметрах $\{a_k\}$ и характеристиках $\vec{n}(t)$ в смеси $\xi(t, \lambda, S)$ исходный момент при построении системной модели – это совокупность априори предполагаемых пределов изменения параметров и характеристик, т.е.

$$D(a_k) = a_{k_{\max}} - a_{k_{\min}}, \quad k = \overline{1, m}$$

с равномерным законом $W(a_k)$ изменения величин внутри заданного диапазона $D(a_k)$.

Процедура обнаружения импульсных сигналов на фоне $\vec{n}(t)$ реализуется в полосе частот, согласованной с диапазоном $D(a_k)$. Во временном базисе это определяется условием:

$$\Delta F_{об} \geq \frac{1}{\tau_{H_{\min}}} \approx f_{об \max},$$

где $\tau_{H_{\min}}$ – минимальное значение длительности импульсов из диапазона

$D(\tau_H)$, $\Delta F_{об}$ – полоса пропускания канала обнаружения сигналов.

Известно [6, 7], что ширина спектра $\Delta F_{ш}$ шумовой помехи

$$\Delta F_{ш} = \frac{\sigma_n^2}{N_0},$$

где N_0 – спектральная плотность шума ($\text{в}^2/\Gamma_{\text{ц}}$); σ_n^2 – дисперсия шума (в^2).

Согласование приемного канала ИИС осуществляется путем оптимизации процедуры обнаружения в соответствии с критерием Неймана-Пирсона [4] при отслеживании и соблюдении условия

$$\Delta F_{ш}^* = \Delta F_{об}(\tau_{H_{\min}}^{*(r)}) \approx \frac{1}{\tau_{H_{\min}}^{*(r)}(T_j)}, \quad (4)$$

где $\Delta F_{ш}^*$ – регулируемая полоса пропускания канала,

$\tau_{H_{\min}}^{*(r)}$ – минимальное значение длительности импульсных сигналов; $\xi(T_{\max}^{(r)}, \lambda, S)$ длительностью $T_{\max}^{(r)}$ в r -ой реализации, определяемого диапазоном $D(T_H) = T_{H_{\max}} - T_{H_{\min}}$, T_H – период (интервал) следования импульсов, $T_H \in \{a_k\}$, $k = \overline{1, m}$.

В соответствии с выражением (4) реализуется квазиоптимальный алгоритм прогнозирования полосы канала обнаружения $\Delta F_{об}^{(jH)}$ и отслеживания процесса обнаружения сигналов в предположении, что $\vec{n}(T_{H_{\max}}^{(r)})$ сохраняет свойства стационарного случайного процесса. При этом соблюдается условие:

$$D(\Delta F_{об}^{(jn)}) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_{H \min}^{*(r)}} \approx f_{об \max}^{(r+1)}; \\ \frac{1}{T_{H \min}^{*(r)}} \approx f_{об \min}^{(r+1)}, \end{cases} \quad (5)$$

где $f_{об \max}^{(r+1)}$, $f_{об \min}^{(r+1)}$ – соответственно прогнозируемые максимальная и мини-

мальная частоты спектра $\Delta F_{об}$ для $r+1$ -й реализации входного воздействия.

Управление величиной $D(\Delta F_{об}^{(r+1)})$, таким образом, базируется на апостериорных данных, полученных на этапах 5 и 7 преобразования входного воздействия (рис. 1) посредством введения обратной связи $\beta(U_1)$, где U_1 – допустимое управление.

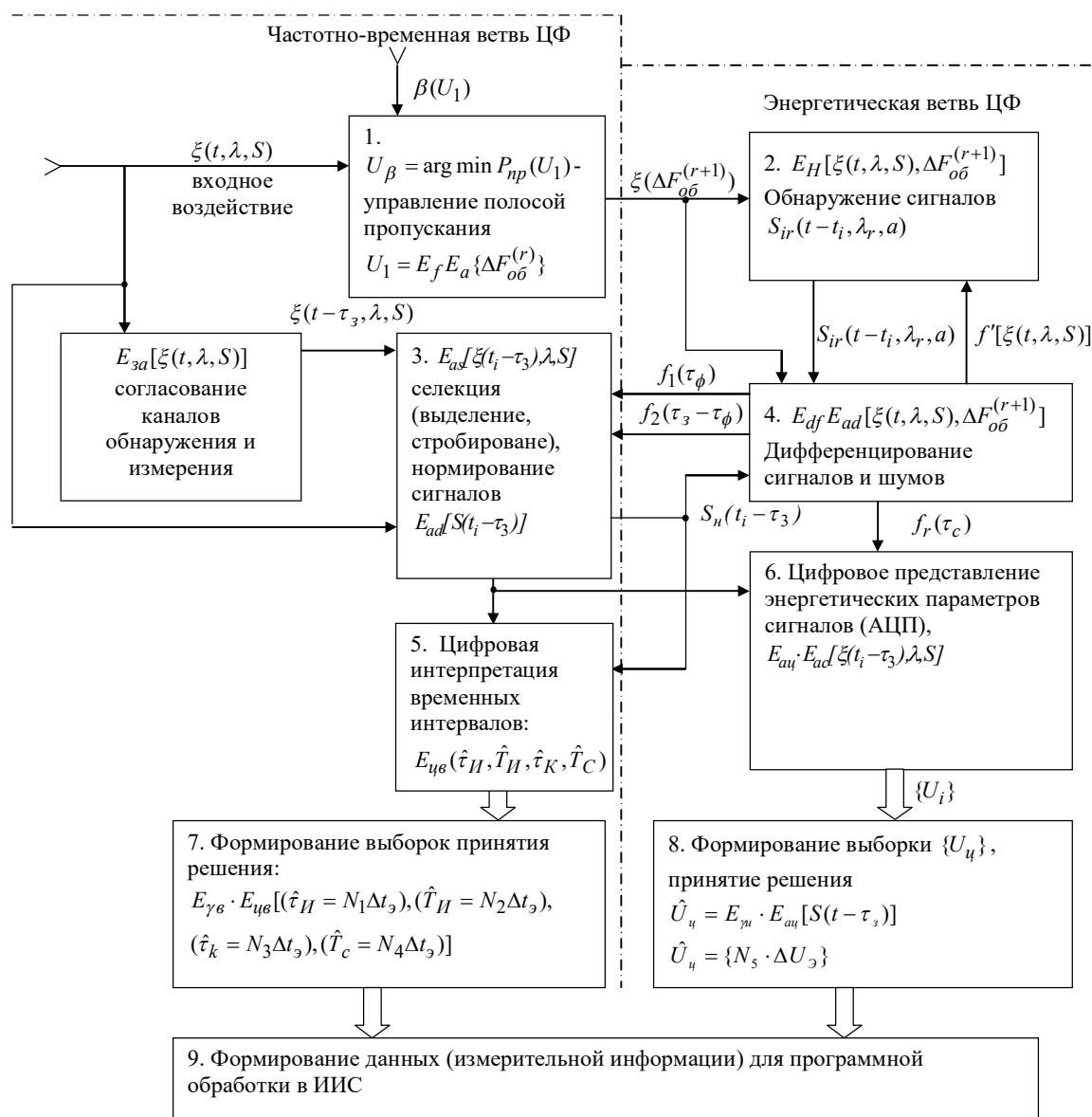


Рис. 1. Системная модель приемного канала (подсистемы) ИИС, структурное представление

Fig. 1. System model of receiving channel (subsystem) of AIS, structural representation

Формально критерий (правило) U_β

можно представить как

$$U_\beta = \operatorname{argmin}_{P_{np}}(U_1), \quad (6)$$

где P_{np} – вероятность пропуска слабого сигнала [5].

В зависимости от свойств потока λ или λ_r алгоритм допустимого управления « U » может использовать и другие оценки $\hat{a}_k$, кроме крайних диапазонных значений (5), в предположении, что $\vec{n}(T_{I\max}^{(r)})$ в r -той реализации здесь также – стационарный случайный процесс. В соответствии с этапами 2-5 системной модели (см. рис. 1) методическая алгоритмизация этих этапов предполагает:

- в пределах j -того сеанса работы ИИС по r -ой реализации $\xi_r(T_{I\max}^*, \lambda_r, S)$ выполняются процедуры обнаружения импульсных сигналов в полосе $\Delta F_{об}^{*(r)}$, их нормирование и измерение текущих значений временных параметров (τ_I, T_I, τ_k) ;

- реализуются операции оценивания временных параметров $(\hat{\tau}_I, \hat{T}_I, \hat{\tau}_k)$ и по полученным оценкам (в цифровом виде) формируется управляющее воздействие $U_\beta^{(r)}$ посредством направленных воздействий (операторов) $E_{as}, E_{ad}, E_{\psi\theta}$;

- формируется управляющее воздействие $U_\beta^{(r)}$ для перестройки прогнозируемой полосы $\Delta F_{об}^{*(r+1)}$.

Согласно выражениям (4), (5) локальная модель вложения в структурном описании, отображающая адаптивное управление $U_\beta^{(r)} \Rightarrow \Delta F_{об}^{*(r+1)}$ полосой пропускания канала обнаружения в подсистеме ИИС, может быть представлена, как показано на рис. 2.

Таким образом, на этапах 1 и 2 (см. рис. 1) адаптивное управление полосой $\Delta F_{об}^{*(r)}$ минимизирует вероятность пропуска P_{np} слабого сигнала [3, 5].

Повышение $q_{сш}$ в измерительном канале подсистемы ИИС возможно также за счет адаптивного управления временной селекцией импульсных сигналов из смеси $\xi_r(T_{\max}, \lambda_r, S)$ на этапе 3 (см. рис. 1), используя выходные импульсы канала обнаружения (рис. 2, $S_i^{(r)}(t_i, a_k)$). Здесь полоса пропускания $\Delta F_{уз}$ измерительного канала выбирается из условия $\Delta F_{уз} \geq \frac{1}{\tau_{\phi\min}}$,

где $\tau_{\phi\min}$ – минимальная длительность фронта анализируемых импульсов. Повышение $q_{сш}$ основано на том, что дисперсия шума в реализации длительностью τ_I пропорционально меньше дисперсии шума в реализации длительностью $T_{I\max}$, $T_{I\max} \geq \tau_{I\max}$. Это реализуется временной селекцией сигналов в измерительном канале за счет его стробирования командами канала обнаружения (точка «А», рис 2, этап 3, рис. 1). Оптимизация этого процесса осуществляется с использованием критерия минимизации длительности стро-

ба, выделяющего анализируемый i -тый импульс из смеси $\xi_r^{(j)}(T_{H_{\max}}, \lambda_r, S)$. При этом q_{cui} в измерительном канале повышается пропорционально соотношению [11, 12, 13]:

$$K_{cui} = \frac{T_{H_{\max}}^{(r)}}{\tau_{cpr_i}},$$

где τ_{cpr_i} – длительность i -го стробирующего импульса, такая, что

$$\tau_{cpr_i} = \tau_{H_i}^{(r)} + \tau_z(E_H). \quad (7)$$

Здесь $\tau_z(E_H)$ – задержка входного воздействия смеси $\xi_r(T_{H_{\max}}, \lambda_r, S)$ на входе измерительного канала подсистемы ИИС, определяемая длительностью операции обнаружения сигнала и формирования вспомогательных (сервисных) процедур для этапов 3 и 5 (см. рис. 1).

Преимущества введения обратной связи «канал обнаружение – канал измерения»:

- снижаются в среднем погрешности аналого-дискретного преобразования импульсных сигналов за счет уменьшения «дребезга» фронтов при их нормировании;

- повышается точность измерения длительности импульсных сигналов на заданном уровне за счет упреждения формирования выборки хранения;

- снижается методическая погрешность оцифровки временных интервалов за счет использования синхронизации генератора эталонных импульсов с периодом Δt_{Σ} (рис. 1 этапы 5, 7) с фронтом оцифруемого временного интервала;

- упрощаются требования [7] к АЦП при цифровом представлении энергетических параметров сигналов (операторы $E_{\psi\psi}$, $E_{\gamma\gamma}$, рис. 1., этапы 6, 8).

Локальная модель вложения, отображающая и детализирующая этап 3 системной модели, приведена на рис. 3. Для управления процессом селекции сигналов с априори неизвестными параметрами используется оператор формирования стробов E_{as} по командам канала обнаружения подсистемы ИИС в соответствии с выражением (7).

При использовании критерия Неймана-Пирсона согласованный линейный фильтр, задачей которого является передача (усиление) сигнала, может быть согласован по полосе после апостериорного обнаружения сигнала и в предположении, что $\xi(t, \lambda, a)$ в течение интервала наблюдения $T_{наб}$ является смесью нормального шума $n(t)$ и импульсной последовательности $S(T, \lambda, \alpha)$. При этом вероятность пропуска сигнала [12]

$$P_{np} = \frac{1}{2} [1 + \Phi(\frac{Y_{nop} - a}{\sqrt{2\sigma_{\psi}}})]. \quad (8)$$

Здесь выражение для управления полосой ΔF

$$U_{\beta} = \arg \min P_{np}(\Delta F) \quad (9)$$

может быть в качестве примера решено в графическом (рис. 4) [6, 12] и аналитическом виде. Здесь [12]

$$P_{лт} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(\frac{Y_{nop}}{\sqrt{2}})], \quad (10)$$

где Φ – табулированная функция.

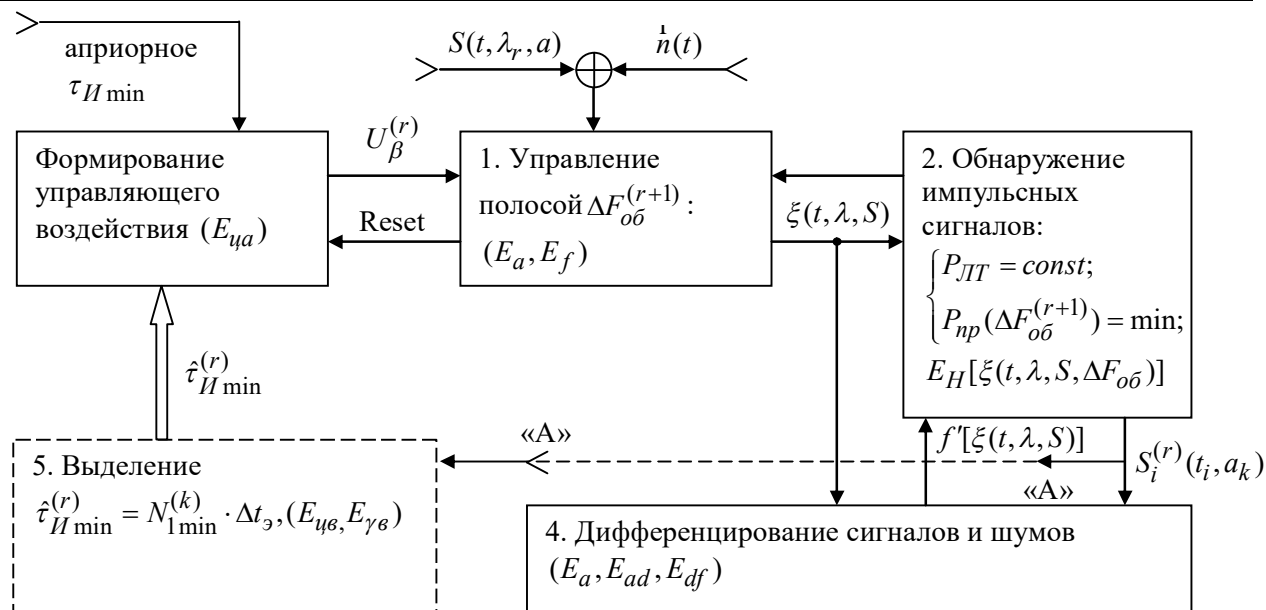


Рис. 2. Локальная модель адаптивного управления полосой пропускания канала обнаружения импульсных сигналов

Fig. 2. Local model of adaptive bandwidth control of pulse signal detection channel

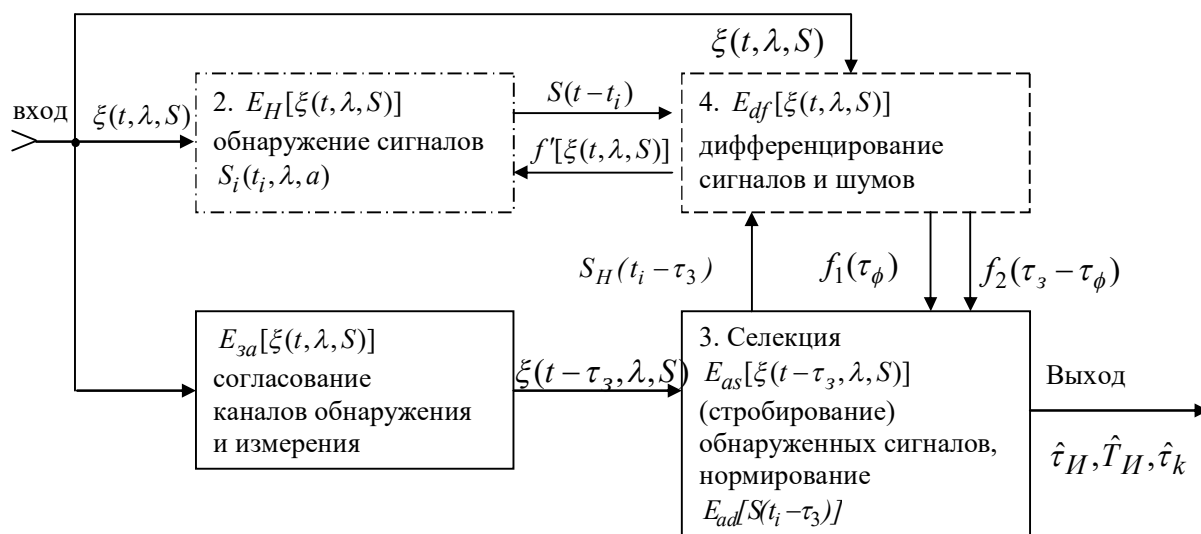


Рис. 3. Локальная модель селекции импульсных сигналов во временном базисе

Fig. 3. A local model of the pulse signals selection in a temporary basis

Если воспользоваться графиком (рис. 4) как $P_{\text{ЛТ}}, P_{\text{пр}} = F(U_{\text{пор}}/\sigma_{\text{ш}})$, то минимизация $P_{\text{пр}}$ для интервала $T_{\text{наб}}$ определяется реальным соотношением q . Энергия i -го импульса $E_{C_i} = U_i^2 \cdot \tau_{\text{И}}$, а энергия шума в пределах полосы филь-

тра $E_{\text{ш}} = N_0 \cdot \Delta F$. Поскольку график (см. рис. 4) удобнее строить в масштабе напряжений (порог здесь $U_{\text{пор}}$ – напряжение), то воспользуемся соотношением $q_{\Phi} = \frac{U_{\text{с вых}}}{\sigma_{\text{ш}}(\Delta F)}$.

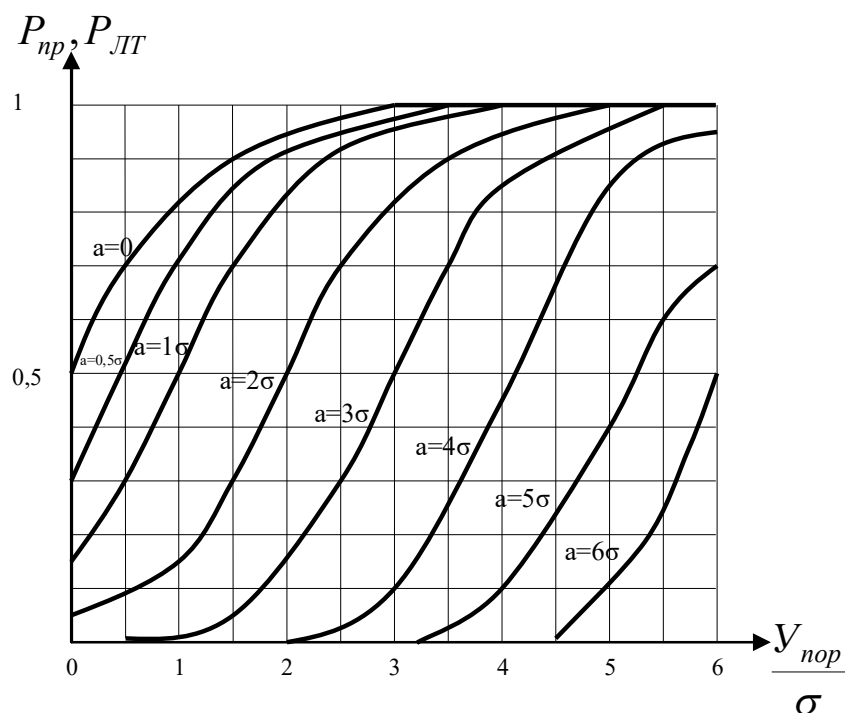


Рис. 4. Графическая зависимость вероятности ложной тревоги и пропуска цели от соотношения $Y_{\text{пор}}/\sigma$

Fig. 4. Graphical dependence of the probability of false alarm and missed target on the ratio $Y_{\text{пор}}/\sigma$

Тогда из рассмотренного графика очевидно, что минимизация $P_{\text{пр}}$ (т.е. вероятность пропуска сигнала) пропорционально связана с повышением $q_{\text{ф}}$ в пределах ΔF_i фильтра, полученного путем управления параметрами линейного фильтра по апостериорным данным текущего результата измерения точечных значений параметров импульсов.

Выводы

Таким образом, использование предложенных методических приемов аналого-дискретного преобразования входного воздействия $\xi(t, \lambda, S)$ позволило улучшить характеристики ИИС в целом, такие как:

- снижение вероятности пропуска слабых сигналов с априори неизвестными характеристиками;

- повышение помехоустойчивости ИИС в части уменьшения влияния импульсных и шумовых помех за счет адаптивного управления полосой пропускания канала обнаружения сигналов и их селекции из смеси сигналов и шумов;

- повышение точности измерения временных параметров импульсных сигналов за счет синхронизации фронтов нормированных импульсов с работой генератора эталонных импульсов дискретизации по времени, а также за счет улучшения соотношения сигнал-шум при адаптивном управлении длительностью стробов селектирующей последовательности.

Преимущество предложенного метода заключается в том, что построенная системная и локальная модели целенаправленных процессов функциони-

рования подсистемы приемного канала информационно-измерительной системы позволили обосновать возможность оптимизации процессов взаимодействия компонентов аналого-дискретного преобразования входного воздей-

ствия при априорной неопределенности относительно формы сигнала, а также пределов изменения его параметров и характеристик. В известных аналогах часть параметров входного воздействия известна заранее.

Список литературы

1. Балашов Е.П., Пузанков Д.В. Проектирование информационно-управляющих систем. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
2. Бурмака А.А., Говорухина Т.Н. Информационно-логическая измерительная система с нечетким множеством состояний // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 134-138.
3. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Часть 1: Методология, методы, модели. М.: Воениздат, 1989. 660 с.
4. Бурмака А.А., Цыплаков Ю.В., Говорухина Т.Н. Обнаружение видеосигналов на фоне адаптивной шумовой помехи при априорной неопределенности характеристик входного воздействия // Радиотехника. 2017. №2. С. 47-52.
5. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Особенности синтеза алгоритмов обработки информации при анализе состояний сложных радиоэлектронных объектов противодействия. Информационный конфликт в спектре магнитных волн // Приложение к журналу "Радиотехника". 1994. С. 4-13.
6. Левин Б.Р. Статистическая радиотехника. Т.1. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
7. Брюханов Ю.А., Лукашевич Ю.А. Влияние аналого-цифрового преобразования сигналов на нелинейные явления в радиоприемных устройствах // Радиотехника. 2017. №2. С. 31-35.
8. Модели подсистем и целенаправленных процессов, реализуемых в информационно-логических измерительных системах распределенного типа / А.А. Бурмака, Н.А. Кореневский, Т.Н. Говорухина, О.А. Терехова // Телекоммуникации. 2013. № 8. С. 8-12.
9. Рябкова Е.Б., Говорухина Т.Н., Кореневский Н.А. Алгоритмы коррекции многомерной линейной разделяющей поверхности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 7. С. 194-199.
10. Цикин А.И. Дискретно-аналоговая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1982. 160 с.
11. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов. М.: Связь, 1980. 216 с.
12. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. Радио, 1967. 347 с.

13. Говорухина Т.Н., Корневский Н.А., Терехова О.А. Подход к оцениванию информативности признаков коммутируемых сигналов в многоканальной информационно-логической системе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 6 (108). С. 24-27.

References

1. Balashov E.P., Puzankov D.V. *Proektirovanie informacionno-upravlyayushchih system* [Design of information-managemental systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987, 256 p. (In Russ).

2. Burmaka A.A., Govorukhina T.N. Informacionno-logicheskaya izmeritel'naya sistema s nechetkim mnozhestvom sostoyanij [Information-logical measuring system with an unspecified set of states]. *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*, 2012, no. 2-3, pp. 134-138. (In Russ).

3. Petuhov G.B. *Osnovy teorii effektivnosti celenapravlennyh processov. CHast' 1: Metodologiya, metody, modeli* [The basics of the targeted processes' effectiveness theory. Part 1: Methodology, methods, models]. Moscow, Voenizdat Publ., 1989, 660 p. (In Russ).

4. Burmaka A.A., Cyplakov Yu.V., Govorukhina T.N. Obnaruzhenie videosignalov na fone adaptivnoj shumovoj pomekhi pri apriornoj neopredelennosti harakteristik vhodnogo vozdeystviya [Detection of video signals against adaptive noise interference with a fore-known uncertainty of input impact characteristics]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2017, no.2, pp. 47-52 (In Russ).

5. Radzievskij V.G., Sirota A.A. Osobennosti sinteza algoritmov obrabotki informacii pri analize sostoyanij slozhnyh radioelektronnyh ob"ektov protivodeystviya. Informacionnyj konflikt v spektre magnitnyh voln. [Information processing algorithms' synthesis features under the analysis of complex radioelectronic counteraction objects' state. Informational conflict in the spectrum of magnetic waves]. *Prilozhenie k zhurnalu "Radiotekhnika" = Supplement to the magazine "Radiotechnics"*, 1994, pp. 4-13 (In Russ).

6. Levin B.R. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radio technology]. Vol.1. Moscow, Sov. radio Publ., 1969, 752 p. (In Russ).

7. Bryuhanov Yu.A., Lukashevich Yu.A. Vliyanie analogo-cifrovogo preobrazovaniya signalov na nelinejnye yavleniya v radiopriemnyh ustrojstvakh [The influence of analog-to-digital signal conversion on nonlinear appearances in radio receivers]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2017, no.2, pp. 31-35 (In Russ).

8. Burmaka A.A., Korenevskij N.A., Govorukhina T.N., Terekhova O.A. Modeli podsistem i celenapravlennyh processov, realizuemyh v informacionno-logicheskikh izmeritel'nyh sistemah raspredelennogo tipa [Subsystems' models and targeted processes implemented in the infor-

9. Ryabkova E.B., Govoruhina T.N., Korenevskij N.A. Algoritmy korrektsii mnogomernoj linejnoy razdelyayushchej poverhnosti [Correction algorithms for multidimensional linear dividing surface]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Voronezh Technical State University*, 2011, vol. 7, no. 7, pp. 194-199. (In Russ).

10. Cikin A.I. *Diskretno-analogovaya obrabotka signalov* [Discrete-to-analog signal processing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, p. 160. (In Russ).

11. Fomin YA.A. *Teoriya vybrosov sluchajnyh processov* [Random processes' emission theory]. Moscow, Svyaz' Publ., 1980, 216 p. (In Russ).

12. Shestov N.S. *Vydelenie opticheskikh signalov na fone sluchajnyh pomekh* [Isolation of optical signals against random noise]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1967. 347 p. (In Russ).

13. Govoruhina T.N., Korenevskij N.A., Terekhova O.A. Podhod k ocenivaniyu informativnosti priznakov kommutiruemykh signalov v mnogokanal'noj informacionno-logicheskoy sisteme [The approach to evaluating the informational content of the switched signals' features in a multichannel information-logical system]. *Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij = Computer and information technology herald*, 2013, no. 6 (108), pp. 24-27. (In Russ).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бурмака Александр Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Alexander A. Burmaka,
Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi @ yandex. ru

Говорухина Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: govtn@mail.ru

Tatyana N. Govorukhina, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: govtn@mail.ru

Горяйнов Роман Юрьевич, аспирант,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный
университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Roman Y. Goryainov, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru