

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Известия
Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 23 № 4 / 2019

**Proceedings
of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 23 № 4 / 2019



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

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

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

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

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

Латыпов 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).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: (4712) 22-25-26,

Факс: (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

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

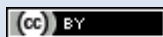
ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2019



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.

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

Периодичность: один раз в два месяца

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 26.08.2019. Формат 60х84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 16,7.

Тираж 1000 экз. Заказ 65.



Proceedings of the Southwest State University

Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

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

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher :
"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

305040, Russia, Kursk, ul. 50 Let Oktyabrya, 94

Phone: (+74712) 22-25-26,

Fax: (+74712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(PI №FS77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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

Subscription and distribution:

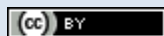
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219 in the Gen-
eral Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: once in two months

Free-of-control price

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2019



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

Sent to the printer 26.08.2019. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 16,7.
Circulation 1000 copies. Order 65.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Использование нейронных сетей для прогнозирования нормальных реакций шагающего робота 8**
Савин С.И., Ворочаева Л.Ю.
- Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов 19**
Котельников А. А., Натаров А. С.
- Исследование гранулометрического состава частиц электроэрозионного хромсодержащего порошка, используемого для износостойкой наплавки 31**
Агеева Е. В., Хардилов С. В., Морозова И. А.
- Исследование колебаний конвертоплана в вертикальной продольной плоскости 42**
Яцун С.Ф., Лушников Б.В., Емельянова О.В., Стуканева С.П.
- Исследование влияния гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков на физико-механические свойства аддитивных изделий..... 57**
Агеев Е. В., Алтухов А. Ю., Новиков А. Н.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

- Влияние расчетной длины элементов на критические параметры устойчивости рамно-стержневых конструктивных систем 72**
Пахомова Е.Г., Дубракова К.О., Дубраков С.В., Завалишин И. В.
- Оценка качества земельных ресурсов и их альтернативное использование при реализации программ застройки территории 84**
Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Сивак Е.Е.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Анализ организации защиты информации в России и других странах мира 93**
Ханис А.Л., Е Щедрина.И., Спевачева С.В.
- Применение теории управления для описания системы управления региональной социально-экономической системой105**
Аверченкова Е.Э., Горбунов А.Н.
- Разработка алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в системах контроля движения промышленной продукции на основе анализа данных мультикодовой маркировки116**
Астафьев А.В.
- Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга состояния мехатронного подшипника жидкостного трения в условиях температурно-вязкостного клина129**
Корнаева Е.П., Корнаев А.В., Корнаев Н.В.

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Using Neural Networks to Predict the Normal Reactions of a Walking Robot.....	8
<i>Savin S. I., Vorochaeva L. Yu.</i>	
The Study of Stress Pattern Arising During Loading in Welded Joints by the Finite Elements Method.....	19
<i>Kotelnikov A. A., Natarov A. S.</i>	
The Study of Particle Size Distribution of Electroerosion Chrome-Containing Powder, Used for Wear Resistant Surfacing	32
<i>Ageeva Y. V., Hardikov S. V., Morozova I. A.</i>	
Study of Tiltrotor Oscillations in a Vertical Longitudinal Plane	42
<i>Jatsun S. F., Lushnikov B. V., Emelyanova O. V., Stukaneva S. P.</i>	
Study of the Influence of the Granulometric Composition of Electrospark Cobalt-Chromium Powders on the Physical and Mechanical Properties of Additive Products.....	57
<i>Ageev E. V., Altuhov A. Y., Novikov A. N.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Influence of Effective Length of Elements on the Critical Parameters of Frame-Rod Structural Systems' Stability	72
<i>Pakhomova Y. G., Dubrakova K. O., Dubrakov S. V., Zavalishin I. V.</i>	
Assessment of Land Resources Quality and Their Alternative Use in the Implementation of Building Development Programs	85
<i>Shleenko A. V., Volkova S. N., Sivak E. E.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Analysis of the Information Security Arrangement in Russia and Other Countries.....	93
<i>Hanis A. L., Shhedrina Y. I., Spevakova S. V.</i>	
Application of Control Theory to Describe the Management of the Regional Socio-Economic System.....	105
<i>Averchenkova E. E., Gorbunov A. N.</i>	
Development of Algorithm for Abnormal Situations' Prediction and Prevention in Industrial Product Movement Control Systems Based on Multicode Marking Data Analysis.....	116
<i>Astafiev A. V.</i>	
Application of Artificial Neural Networks for Monitoring Conditions of Liquid Friction Mechatron Bearing under Temperature-Viscosity Wedge Conditions	129
<i>Kornaeva E. P., Kornaev A. V., Kornaev N. V.</i>	

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-8-18>

Использование нейронных сетей для прогнозирования нормальных реакций шагающего робота

С.И. Савин¹, Л.Ю. Ворочаева² ✉

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

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

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Данная работа посвящена решению одной из проблем, связанных с управлением шагающими роботами на основе их динамической математической модели, – наличию в ней явных механических связей, обусловленных реакциями связей с опорной поверхностью. Для решения указанной проблемы предлагается использовать полносвязную нейронную сеть для оценки сил нормальных реакций между поверхностью и стопами двуногого шагающего робота во время реализации им одного шага.

Методы. В работе рассмотрены две архитектуры нейронной сети, основанные на полносвязных слоях с ReLU активационными функциями. Архитектура нейронной сети включает в себя пять полносвязных слоев (входной, выходной и три скрытых), а альтернативная архитектура включает в себя слой прореживания после каждого полносвязного слоя. Входными данными для сети являются состояние робота и требуемые управляющие воздействия, а выходными – предсказанные силы реакции. Обучающая выборка генерируется с помощью моделирования полной динамической модели робота. Сеть построена и обучена с использованием библиотек машинного обучения Keras и TensorFlow.

Результаты. Описана генерация обучающей выборки для нейронной сети, проведено обучение двух архитектур нейронных сетей. На основании данных моделирования установлено, что обе обученные нейронные сети способны точно предсказывать значения нормальных реакций с использованием значений обобщенных координат и скоростей, а также управляющих воздействий в качестве входных данных, однако при этом наблюдается статическая ошибка предсказания.

Заключение. Полученные в рамках статьи результаты могут в дальнейшем использоваться для управления движением двуногих шагающих роботов по различным типам поверхностей.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот; нейронная сеть; архитектура нейронной сети; слой прореживания; полносвязный слой; обучающая и верификационная выборки; нормальные реакции.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Гранта Президента МК-1537.2019.8, Савин С.И. работал при поддержке РФФИ, проект №18-38-00140\18.

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

Для цитирования: Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Использование нейронных сетей для прогнозирования нормальных реакций шагающего робота // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 8-18. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-8-18>.

Статья поступила в редакцию 13.06.2019

Статья подписана в печать 22.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-8-18>

Using Neural Networks to Predict the Normal Reactions of a Walking Robot

Sergey I. Savin ¹, Lyudmila Yu. Vorochaeva ² ✉

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

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

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. This work is devoted to solving one of the problems associated with the control of walking robots based on their dynamic mathematical model – the presence in it of obvious mechanical bonds due to reactions of bonds with the supporting surface. To solve this problem, it is proposed to use a fully connected neural network to evaluate the forces of normal reactions between the surface and the feet of a bipedal walking machine during its implementation of one step.

Methods. The paper considers two neural network architectures based on fully connected layers with ReLU activation functions. The architecture of the neural network includes five fully connected layers (input, output and three hidden), and an alternative architecture includes a thinning layer after each fully connected layer. The input data for the network are the state of the robot and the required control actions, and the output is the predicted reaction forces. The training sample is generated by modeling a complete dynamic model of the robot. The network is built and trained using machine learning libraries Keras and TensorFlow.

Results. The generation of training sample for neural network is described here, and it is carried out the training of two architectures of neural networks. Based on the simulation data, it was established that both trained neural networks are able to accurately predict the values of normal reactions using the values of generalized coordinates and velocities, as well as control actions as input, however, a static prediction error is observed.

Conclusion. The results obtained within the framework of the article can be further used to control the movement of bipedal walking machines on various types of surfaces.

Keywords: bipedal walking machine; neural network; neural network architecture; thinning layer; fully connected layer; training and verification samples; normal reactions.

Acknowledgements: This work was supported by the Grant of the President MK-1537.2019.8, Savin S.I. worked with the support of the Russian Federal Property Fund, project No. 18-38-00140 \ 18.

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

For citation: Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. Using Neural Networks to Predict the Normal Reactions of a Walking Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 8-18 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-8-18>.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Введение

Шагающие роботы представляют собой системы с дефицитом управляющих воздействий, а их динамика зависит, в том числе, от сил взаимодействия с опорной поверхностью. Это играет важную роль в схемах управления, разработанных для таких роботов [1]. Регуляторы для управления шагающими роботами можно разделить на две категории по используемым в них методам управления. К первой категории относятся регуляторы, которые построены на методах, явно учитывающих силы реакции при расчете желаемых управляющих воздействий [2]. Эти методы позволяют использовать полную динамическую модель робота, что повышает их точность. Будем называть методы этой категории явными.

Вторая категория включает в себя методы управления, которые не учитывают силы реакции или учитывают их неявно [3]. Методы этой категории будем называть неявными, их преимуществами является относительная простота и независимость от сил реакции, которые на практике могут быть достаточно трудно измеряемыми, особенно это касается сил трения.

Силы реакций связей полностью определяются динамикой робота и управляющими воздействиями, для их прогнозирования можно использовать аппроксимирующие функции. Один из эффективных способов реализации аппроксимирующих функций основан на

использовании нейронных сетей, что обусловлено высокоэффективными программными и аппаратными решениями, предназначенными для обучения нейронных сетей со значительным числом слоев. Именно поэтому в данной работе рассмотрены вопросы прогнозирования сил реакции на основе данных о текущем состоянии робота (скоростях и положениях звеньев робота) и выбранных управляющих воздействиях с использованием нейронной сети.

Материалы и методы

Модель шагающего робота

Рассмотрим шагающего робота, движущегося в сагиттальной плоскости при выполнении одного шага (рис. 1).

На рис. 1 точки O_i – шарниры робота; N_i – нормальные силы реакции, F_{fr} – силы трения. Динамика робота может быть описана следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{F}^T\boldsymbol{\lambda}, \\ \mathbf{F}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{F}}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{q}$ – вектор обобщенных координат; $\mathbf{H}$ – обобщенная матрица инерции; $\mathbf{c}$ – вектор обобщенных сил, создаваемых гравитационными и инерционными силами, а также трением в шарнирах; $\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{B}$ – матрица моментов приводов; $\boldsymbol{\lambda}$ – вектор коэффициентов Лагранжа, соответствующий силам реакции; $\mathbf{F}$ – матрица Якоби уравнений связи.

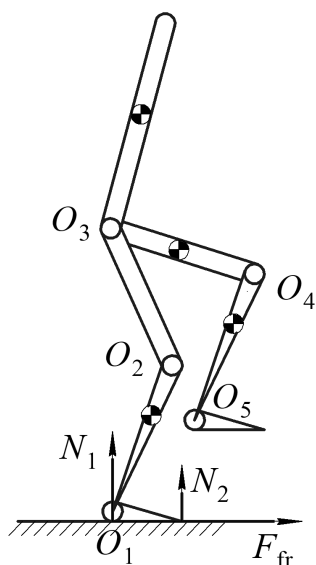


Рис. 1. Расчетная схема шагающего робота

Fig. 1. Settlement scheme for a walking machine

Уравнения (1) используются для моделирования динамики робота. Вывод уравнений (1), эффективные алгоритмы вычисления упомянутых матриц и векторов, а также другие детали, связанные с моделированием механических систем с явными связями, можно найти в работе [4]. Траектории робота, используемые в данной работе, не включают ударные взаимодействия, а также приобретение контакта с опорной поверхностью или отрыв звеньев робота от нее.

Будем использовать уравнения динамики, полученные из уравнений Лагранжа, и будем интегрировать их для заданного регулятора и входного управляющего сигнала. Также возможно использование программного обеспечения для моделирования абсолютно твердого тела для получения аналогичных результатов. В этом случае явная модель динамики робота не требуется.

Сбор данных для обучения нейронной сети

Нейронная сеть должна предсказывать значение вектора λ на основе текущих значений обобщенных координат $\mathbf{q}$, обобщенных скоростей $\dot{\mathbf{q}}$ и управляющих воздействий $\mathbf{u}$. Можно записать входной вектор $\mathbf{y}$ для нейронной сети следующим образом:

$$\mathbf{y} = [\mathbf{q}^T \quad \dot{\mathbf{q}}^T \quad \mathbf{u}^T]. \quad (2)$$

Для хорошего обобщения информации нейронные сети должны получать различные данные, описывающие все аспекты и особенности поведения системы. Для сбора обучающей выборки производится моделирование выполнения роботом ряда различных движений, задаваемых желаемыми траекториями $\mathbf{q}_k^*(t)$, где k является индексом траектории. Робот использует CLQR регулятор для генерации управляющих воздействий $\mathbf{u}$. Алгоритм работы CLQR регулятора предложен в [5] и более детально изучен в [6].

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_N \mathbf{N}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + \mathbf{u}^*, \quad (3)$$

где $\mathbf{K}_N$ – матрица коэффициентов регулятора, получаемая путем решения уравнения Риккати для линеаризованной модели динамики робота; $\mathbf{N}$ – матрица проекции в ядро линейного оператора матрицы связей; $\mathbf{x}$ – вектор состояния, $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T \quad \dot{\mathbf{q}}^T]^T$; $\mathbf{u}^*$ – вектор желаемых управляющих воздействий, полученный путем решения обратной задачи динамики.

Для заданных значений $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$ и $\mathbf{u}$ можно найти $\ddot{\mathbf{q}}$ и $\boldsymbol{\lambda}$, используя динамическую модель робота (1):

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & -\mathbf{F}^T \\ \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{c} \\ -\dot{\mathbf{F}}\dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $(\cdot)^+$ – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза.

В целях предотвращения переобучения и повышения устойчивости предиктора к малым ошибкам входных данных можно использовать нелинейные модели датчика для генерации обучающей выборки. В данном исследовании рассмотрим следующую модель датчика:

$$\bar{\mathbf{q}} = s \cdot \left\lfloor \frac{\mathbf{q} + \boldsymbol{\eta}}{s} \right\rfloor, \quad (5)$$

где $\bar{\mathbf{q}}$ – измеренное значение $\mathbf{q}$; s – разрешение датчика; $\boldsymbol{\eta}$ – случайный шум датчика, $\lfloor \cdot \rfloor$ – функция округления к меньшему целому числу.

Датчики скоростей $\dot{\mathbf{q}}$ и реакций $\boldsymbol{\lambda}$ имеют аналогичные модели. Схожие модели датчиков были рассмотрены в работах [7]. Здесь предполагается, что разрешение датчика равно $s = 10^{-2}$, а шум $\boldsymbol{\eta}$ равномерно распределяется в диапазоне $[-10^{-2} \ 10^{-2}]$ с соответствующими единицами измерения.

Для данного робота векторы $\mathbf{q}$ и $\dot{\mathbf{q}}$ содержат по 9 элементов каждый, вектор $\mathbf{u}$ имеет 6 элементов и вектор $\boldsymbol{\lambda}$ состоит из 3 элементов. Таким образом, обучающая выборка может быть представлена в виде таблицы с 27 столбцами

и N строками. Будем использовать 100 численных экспериментов с различными желаемыми траекториями $\mathbf{q}_k^*(t)$, количество собранных данных составляет $N = 2 \cdot 10^5$.

Архитектура нейронной сети

Используемые здесь нейронные сети можно рассматривать как функцию:

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}} = \Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}), \quad (6)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\lambda}}$ – предсказанное значение $\boldsymbol{\lambda}$.

Для реализации предиктора используется архитектура из 5 полносвязных слоев, в том числе входного, выходного и трех скрытых слоев. Предлагаемая структура нейронной сети показана на рис. 2. На рис. 2 FC означает «полносвязный» и ReLU означает использование ReLU активационной функции [8]; количество нейронов в каждом слое, а также функция активации указаны в скобках. Такая архитектура позволяет сравнительно быстро производить обучение сети и получать необходимые прогнозы, что особенно важно ввиду того, что эти прогнозы учитываются регулятором робота как часть контура управления в режиме реального времени. Будем называть такую архитектуру нейронной сети главной.

Альтернативная архитектура, рассматриваемая в данном исследовании, включает в себя слой прореживания (dropout layer) после каждого полносвязного слоя. Использование слоев прореживания позволяет предотвратить переобучение [9].

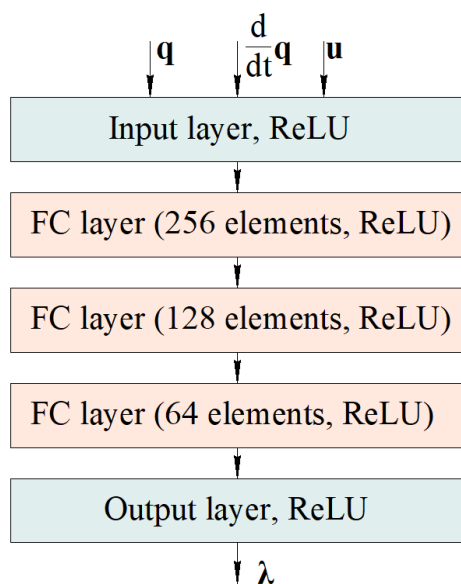


Рис. 2. Структура нейронной сети

Fig. 2. Neural network structure

Каждый из слоев прореживания имеет пропорцию прореживания 15%.

Результаты и их обсуждение

Реализация нейронной сети и её обучение

Предлагаемая нейронная сеть реализована с использованием TensorFlow – машинного обучения, которое позволяет эффективно использовать GPU (graphic processor units) для вычислений [10]. Система построена с применением библиотеки высокого уровня Keras. Обучение проводилось с помощью алгоритма оптимизации Adam, скорость обучения составила $5 \cdot 10^{-3}$ на обучающей выборке типа minibatch из 64 образцов. 85% данных в выборке использовались в процессе обучения, 15% были зарезервированы для проверки. Было проведено несколько сеансов обучения,

каждый из которых начинался с весовыми коэффициентами, инициализированными с помощью Glorot инициализатора [11]. Сеансы обучения были проведены отдельно для набора данных, генерируемых с использованием нелинейной модели датчика (5), и отдельно для набора данных, полученного в результате моделирования с идеальными сенсорами. В каждом случае точность нейронной сети составила более 98%, а значение целевой функции – меньше $1 \cdot 10^{-4}$ в течение первых 10 эпох. Это свидетельствует о том, что архитектура сети и доступные наборы данных позволяют производить обучение быстро, эффективно и надежно.

Результаты одного из сеансов обучения показаны на рис. 3, а. Обучение длилось в течение 150 эпох, скорость обучения была снижена до $2,5 \cdot 10^{-3}$ после первых 75 эпох, обучающая выборка содержит нелинейные модели датчиков.

По приведенным графикам видно, что нейронная сеть демонстрирует устойчивую сходимость на обучающей выборке (сплошная синяя линия) и умеренно колебательное поведение на верификационной выборке (черная пунктирная линия). В проводимых экспериментах сеть со слоями прореживания не имеет значительных преимуществ, что подтверждается графиками рис. 3, б. Это может быть обусловлено значительным числом данных в обучающей выборке и относительно короткими сеансами обучения.

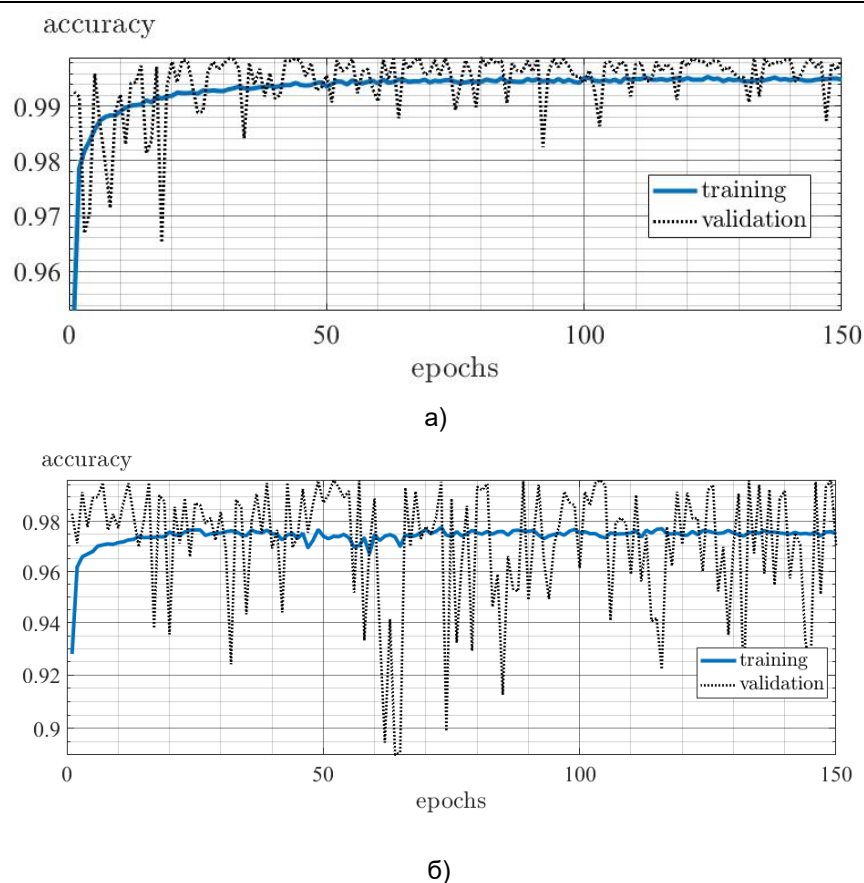


Рис. 3. Функция точности: а – для главной архитектуры сети; б – для сети с архитектурой прореживания

Fig. 3. Function of accuracy: a - main architecture network; b – network architecture thinning

Возможно, регуляризующий эффект слоев прореживания будет проявляться при более длительных сеансах обучения и разной пропорции прореживания [9]. Однако поскольку обучающая выборка генерируется в симуляторе, существует риск того, что при длительных сеансах обучения сеть будет адаптироваться к особенностям конкретного симулятора или модели. Вопросы достижения оптимальной производительности предиктора включают в себя такие моменты, как оптимальное генерирование и первичная обработка обучающей выборки.

Результаты моделирования работы сенсорной системы робота с обученной нейронной сетью

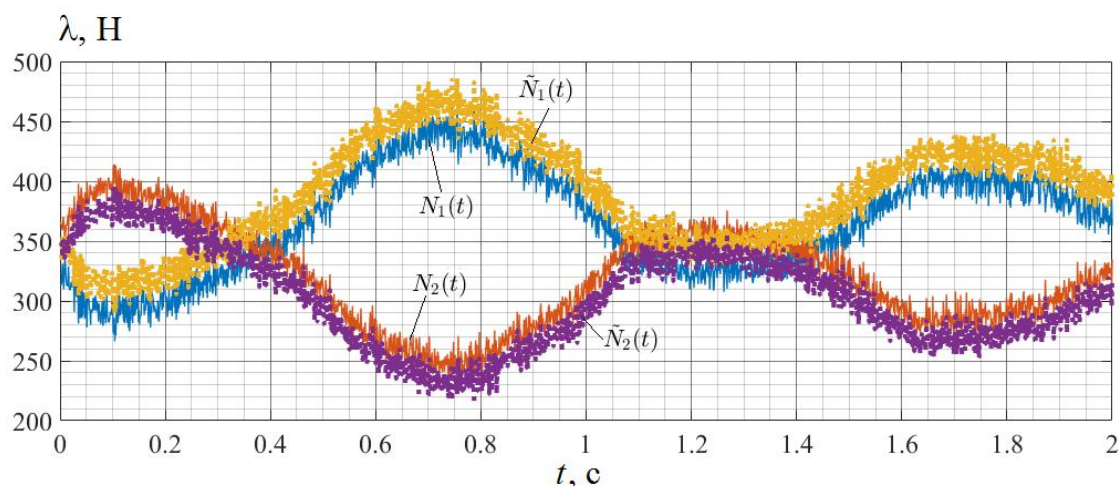
Для оценки качества обученной сети проведем численный эксперимент, в котором сеть будет использоваться совместно с моделью робота. Моделирование проводится с постоянным шагом по времени 1 мс. В этом эксперименте использована главная архитектура обучения в течение 150 эпох. На рис. 4 представлены графики фактических (N_1 , N_2) и предсказанных ($\tilde{N}_1$, $\tilde{N}_2$) значений нормальных реакций, действующих на робота. На рис. 4, а пока-

зана вся продолжительность моделирования (2 с), а на рис. 4, б – только первые 0,08 с.

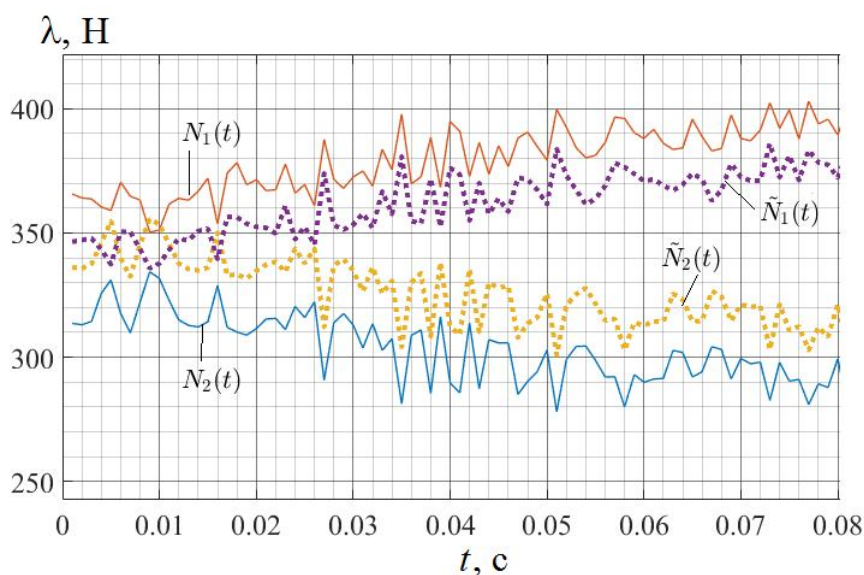
По графикам видно, что между фактическими и прогнозируемыми значениями нормальных реакций существует статическая ошибка. В противном случае при прогнозировании удает-

ся точно отслеживать фактические значения, полностью копируя форму исходного сигнала.

Графики рис. 4 иллюстрируют, что потеря приобретенных в процессе обучения данных происходит в основном из-за указанной выше статической ошибки предсказания.



а



б

Рис. 4. Графики временных зависимостей нормальных реакций при времени моделирования: а – 2 с; б – 0,08 с

Fig. 4. Time dependence graphs of normal reactions at simulation time: а – 2 s; б – 0,08 s

Эксперименты с другими сетями (с архитектурой прореживания и с главной архитектурой, но с более короткими сеансами обучения) показали, что точность обучения может варьироваться, но статическая ошибка остается доминирующим типом ошибки.

Выводы

В данной работе предложена полносвязная нейронная сеть для оценки сил нормальных реакций между поверхностью и стопами двуногого шагающего робота во время реализации им одного шага. Входными данными для сети являются состояние робота и требуемые управляющие воздействия, а выходными – предсказанные силы ре-

акции. Обучающая выборка данных генерируется с помощью моделирования полной динамической модели робота. Сеть построена и обучена с использованием библиотеки Keras и машинного обучения TensorFlow.

Проведено тестирование работы двух архитектур нейронной сети: со слоями прореживания и без них. Обе показали хорошие результаты работы, демонстрируя схождение результатов в процессе обучения. С помощью численного эксперимента установлено, что обученная сеть может точно прогнозировать силы реакции, однако при этом наблюдается статическая ошибка предсказания.

Список литературы

1. Werner A., Henze B., Rodriguez D.A., Gabaret J., Porges O., Roa M.A. Multi-contact planning and control for a torque-controlled humanoid robot // *Intelligent Robots and Systems (IROS): Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf., Daejeon, South Korea*. 2016. P. 5708-5715.
2. Posa M., Cantu C., Tedrake R. A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact // *Intern. J. of Robotics Research*. 2014. Vol. 33(1). P. 69-81.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences // *Symposium on Robot Design, Dynamics and Control*. Springer, Cham. 2016. P. 361-368.
4. Featherstone R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*. Boston, MA: Springer US, 2014. 271 p.
5. Mason S., Righetti L., Schaal S. Full dynamics LQR control of a humanoid robot: An experimental study on balancing and squatting // *Humanoid Robots: Proc. IEEE-RAS Intern. Conf., Madrid, Spain*, 2014. P. 374-379.
6. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of constrained LQR for control of walking in-pipe robots // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Intern. Conf., Omsk, Russia*, 2017. P. 1-6.
7. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. State observer design for a walking in-pipe robot // *MATEC Web of Conferences: EDP Sciences*. 2018. Vol. 161. P. 03012.

8. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview // *Neural Networks*. 2015. Vol. (61). P. 85–117.
9. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting // *J. of Machine Learning Research*. 2014. Vol. 15(1). P. 1929-1958.
10. Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., Dean J., ... Kudlur M. Tensorflow: A system for large-scale machine learning // *Operating Systems Design and Implementation: Proc. 12th Symposium, Savannah, GA, USA, 2016*. P. 265-283.
11. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks // *Artificial Intelligence and Statistics: Proc. of the 13-th Intern. Conf., Scottsdale, AZ, USA, 2010*. P. 249-256.

References

1. Werner A., Henze B., Rodriguez D.A., Gabaret J., Porges O., Roa M.A. Multi-contact planning and control for a torque-controlled humanoid robot. *Intelligent Robots and Systems (IROS): Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf., Daejeon, South Korea, 2016*, pp. 5708-5715.
2. Posa M., Cantu C., Tedrake R. A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact. *Intern. J. of Robotics Research*, 2014, vol. 33(1), pp. 69-81.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences. *Symposium on Robot Design, Dynamics and Control*. Springer, Cham, 2016, pp. 361-368.
4. Featherstone R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*. Boston, MA: Springer US, 2014, 271 p.
5. Mason S., Righetti L., Schaal S. Full dynamics LQR control of a humanoid robot: An experimental study on balancing and squatting. *Humanoid Robots: Proc. IEEE-RAS Intern. Conf., Madrid, Spain, 2014*, pp. 374-379.
6. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of constrained LQR for control of walking in-pipe robots. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Intern. Conf., Omsk, Russia. 2017*, pp. 1-6.
7. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. State observer design for a walking in-pipe robot. *MATEC Web of Conferences: EDP Sciences*. 2018, vol. 161, pp. 03012.
8. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 2015, vol. (61), pp. 85–117.
9. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *J. of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15(1), pp. 1929-1958.

10. Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., Dean J., ... Kudlur M. Tensorflow: A system for large-scale machine learning. Operating Systems Design and Implementation: Proc. 12th Symposium, Savannah, GA, USA, 2016, pp. 265-283.
11. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. Artificial Intelligence and Statistics: Proc. of the 13-th Intern. Conf., Scottsdale, AZ, USA, 2010, pp. 249-256.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

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

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

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>

Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов

А. А. Котельников ¹ ✉, А. С. Натаров ¹

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

✉ e-mail: kotelnikov1939@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Экстремальные условия работы элементов современных конструкций, сложность их формы и большие габариты делают исключительно трудным и дорогим осуществление натурного или полунатурного эксперимента, особенно, если речь идет об установлении предельных (разрушающих) нагрузок, поэтому при прочностных расчетах необходимо прибегать к численным методам, к которым относится и метод конечных элементов. Метод конечных элементов не ограничен ни формой конструкции, ни способом приложения нагрузки. Наиболее ответственной частью конструкции являются сварные соединения. Нередки случаи, когда разрушение конструкции происходило в области сварки. В связи этим данная работа посвящена исследованию напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях пневматического баллона.

Методы. В данной статье используется расчет методом конечных элементов сварных соединений пневматического баллона в программном комплексе APM FEM.

Результаты. Приведенные в статье результаты исследования показывают, что распределение напряжений в сварных соединениях отличается в различных разрезах и расположении в конструкции.

Заключение. Применение метода конечных элементов позволяет оценить распределение напряжений в сварном соединении в конкретном сечении, таким образом, позволяя подобрать необходимое конструктивное исполнение и рационально расположить сварное соединение.

Ключевые слова: сварное соединение; метод конечных элементов; программный комплекс; распределение напряжений, разрез.

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

Для цитирования: Котельников А. А., Натаров А. С. Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 19-30. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>.

Статья поступила в редакцию 06.05.2019

Статья подписана в печать 28.06.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>

The Study of Stress Pattern Arising During Loading in Welded Joints by the Finite Elements Method

Anatoly A. Kotelnikov ¹ ✉, Artyom S. Natarov ¹

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

✉ e-mail: kotelnikov1939@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The extreme working conditions of the elements of modern designs, the complexity of their shape and large dimensions make it extremely difficult and expensive to carry out a full-scale or semi-natural experiment, especially when it comes to establishing ultimate (breaking) loads, therefore, in strength calculations, it is necessary to resort to numerical methods, which include the finite elements method. The finite elements method is not limited by either the form of the structure or the method of applying the load. The most critical part of the design is welded joints. There are frequent cases when the structural failure occurred in the field of welding. In this regard, this work is devoted to the stress analysis arising during loading in welded joints of pneumatic cylinder.

Methods. This article uses finite elements analysis of welded joints of a pneumatic cylinder in the APM FEM software package.

Results. The research results presented in the article show that the stress pattern in welded joints differs in different sections and arrangement in the structure.

Conclusion. The use of the finite elements method allows us to evaluate the stress pattern in a welded joint in a particular section and to select the necessary design and rationally position the welded joint.

Key words: welded joint; finite elements method; software package; stress pattern, section.

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

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

For citation: Kotelnikov A. A., Natarov A. S. The Study of Stress Pattern Arising During Loading in Welded Joints by the Finite Elements Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 19-30 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>.

Received 06.05.2019

Accepted 28.06.2019

Введение

Экстремальные условия работы элементов современных конструкций, сложность их формы и большие габариты делают исключительно трудным и дорогим осуществление натурного или полунатурного эксперимента, особенно,

если речь идет об установлении предельных (разрушающих) нагрузок. Поэтому при прочностных расчетах необходимо прибегать к численным методам, к которым относится и метод конечных элементов. Метод конечных элементов не ограничен ни формой

конструкции, ни способом приложения нагрузки [1].

Неотъемлемой частью выпускаемых локомотивов являются пневматические баллоны вместимостью 25-600 л., которые применяются в системах тормоза, автоматики и пожаротушения.

Условия их работы характеризуются наличием внутреннего статического давления, действующего краткое или длительное время при нормальной или пониженной температуре, выполняя при этом функции накопления и сохранения воздуха. В тормозных системах используются баллоны вместимостью 222, 250, 500, 600, в питательных – 120, 222, 250, запасные баллоны имеют вместимость 20, 55, уравнильные – 20, вспомогательные – 5 и 20 л. Для огнетушащей жидкости используется баллон вместимостью 260 л.

Пневматический баллон состоит из следующих конструктивных элементов: цилиндрической обечайки, изготовленной из листовой стали толщиной 5-6 мм; двух выпуклых днищ толщиной 6-8 мм; штуцера для присоединения воздухопровода и штуцера для постановки выпускного крана [2].

От качества и выбранного конструктивного исполнения сварного соединения зависит длительность непрерывной работы конструкции. Цель данной работы – исследовать распределение напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях пневматического баллона.

Материалы и методы

Для анализа напряженно деформируемого состояния сварных соединений была построена модель баллона со сварными швами. В качестве материала была принята сталь 10. В модели были построены два стыковых шва, соединяющих обечайку с днищами, и два тавровых шва, соединяющих обечайку со штуцерами. Модель стыкового шва имеет конструктивное исполнение стыкового шва С2 ГОСТ 14771-76. Модель таврового шва имеет конструктивное исполнение таврового шва Т6 ГОСТ 14771-76¹ [3, 4, 5].

Анализ напряжений проводился в точках на оси сварного шва, как показано на рис. 1.

К баллону было приложено давление 2,5 МПа, в том числе к поверхностям, относящимся к сварным швам.

Для анализа напряженно деформируемого состояния баллона была построена конечно-элементная сетка. Параметры сетки представлены в табл. 1. Сетки сварных соединений представлены на рис. 2 и 3.

Были произведены замеры значений напряжений по всему сечению верхнего таврового шва, бокового таврового шва, стыкового шва (см. рис. 1). Измерения проводились в характерных разрезах, которые представлены на рис. 4. Результаты исследований для верхнего таврового шва представлены в табл. 2, для бокового таврового шва – в табл. 3, для стыкового шва – в табл. 4 [5, 6, 7].

¹ ГОСТ 14771-71. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1977. 39 с.

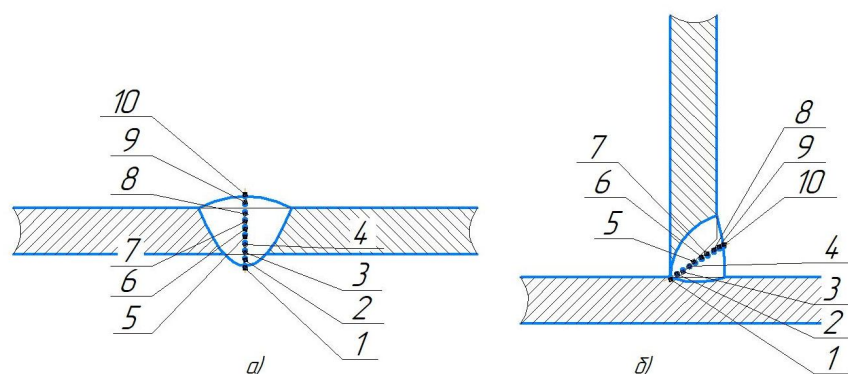


Рис. 1. Точки исследований напряжений сварных соединений: а – стыковой шов; б – тавровый шов

Fig. 1. The point of study of the stress of welded joints: a – - butt joint; b – T-joint

Таблица 1

Параметры сетки решателя APM FEM

Table 1

Parameters of the mesh solver APM FEM

Параметр сетки	Значение параметра
Вид КЭ элемента	4-узловой тетраэдр
Максимальная длина стороны элемента	20 мм
Максимальный коэффициент сгущения на поверхности	10
Коэффициент разрежения в объеме	1,5

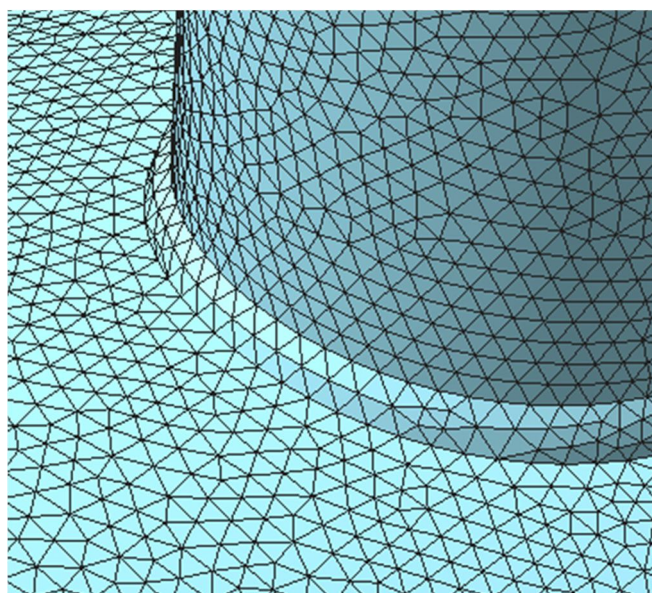


Рис. 2. Сетка верхнего таврового шва в системе APM FEM

Fig. 2. Grid of the upper T-joint in the APM FEM system

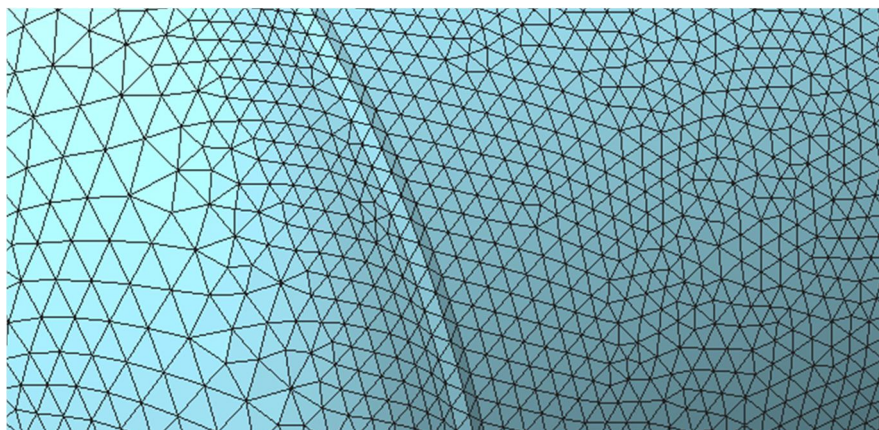


Рис. 3. Сетка стыкового шва в системе APM FEM

Fig. 3. Grid of a butt joint in APM FEM system

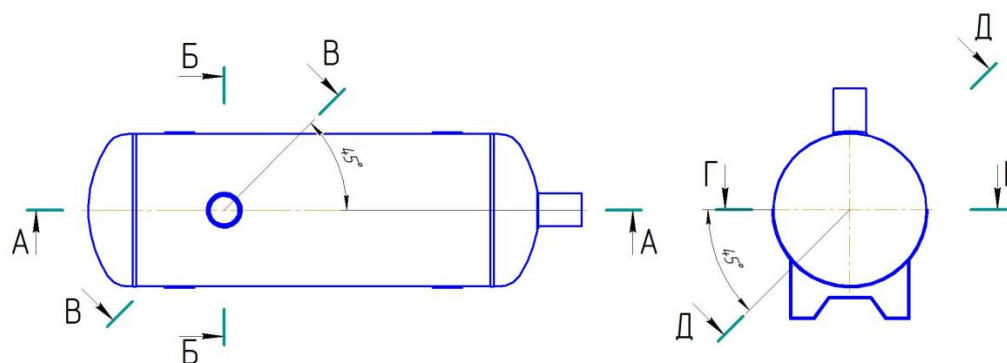


Рис. 4. Исследуемые разрезы

Fig. 4. Investigated Cuts

Таблица 2

Значения напряжений для верхнего таврового шва в исследуемых точках
в характерных разрезах, МПа

Table 2

Stress values for the upper T-joint seam at the studied points
in the characteristic sections, МПа

Точки	Разрез А-А	Разрез В-В	Разрез Б-Б
1	196,374	117,755	48,295
2	182,209	110,464	43,439
3	169,956	107,534	45,12
4	156,402	104,996	47,422
5	147,544	104,255	52,044
6	139,791	100,92	54,284
7	130,626	99,084	56,529
8	122,634	96,211	58,574
9	115,206	93,756	60,155
10	107,293	91,366	61,074

Таблица 3

Значения напряжений для бокового таврового шва в исследуемых точках
в характерных разрезах, МПа

Table 3

Stress values for the lateral seam of the tee-examined points
in the characteristic sections, МПа

Точки	Разрез А-А	Разрез Д-Д	Разрез Г-Г
1	127,44	128,861	125,513
2	124,097	124,631	122,991
3	119,909	119,324	120,922
4	115,177	114,083	116,554
5	111,229	110,667	111,184
6	107,807	106,509	105,012
7	104,688	102,529	99,932
8	100,614	98,575	95,645
9	97,87	96,523	91,337
10	93,7	93,485	87,665

Таблица 4

Значения напряжений для стыкового шва в исследуемых точках
в характерных разрезах, МПа

Table 4

Stress values for the butt joint at the studied points in characteristic sections, МПа

Точки	Разрез А-А	Разрез Д-Д	Разрез Г-Г
1	40,105	48,984	48,37
2	40,928	49,342	48,996
3	42,235	49,616	49,386
4	44,253	49,938	49,605
5	47,253	50,406	50,376
6	49,628	50,857	50,897
7	49,915	51,403	51,207
8	50,874	51,763	51,953
9	52,177	52,092	52,359
10	53,477	52,329	52,891

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что наибольшие напряжения возникают в верхнем тавровом шве, соединяющем обечайку и верхний патрубок в разрезе А-А, причем распределение напряжений в различных разрезах неодинаково. В

разрезе А-А и В-В напряжения уменьшаются от корня шва к его верхней части, в разрезе Б-Б напряжения увеличиваются от корня к его верхней части (рис. 5). Распределение напряжений в боковом тавровом шве во всех разрезах одинаково – напряжения уменьшаются от корня шва к его верхней части, при-

чем разница между наибольшим и наименьшим значением значительно ниже, чем у верхнего таврового шва (рис. 6). В стыковом шве происходит увеличение напряжений от корня к его верхней части (рис. 7) [8, 9].

Таким образом было установлено, что распределение напряжений, возникающих при нагружении, зависит не только от типа сварного соединения, но и от его расположения в конструкции [10–19].

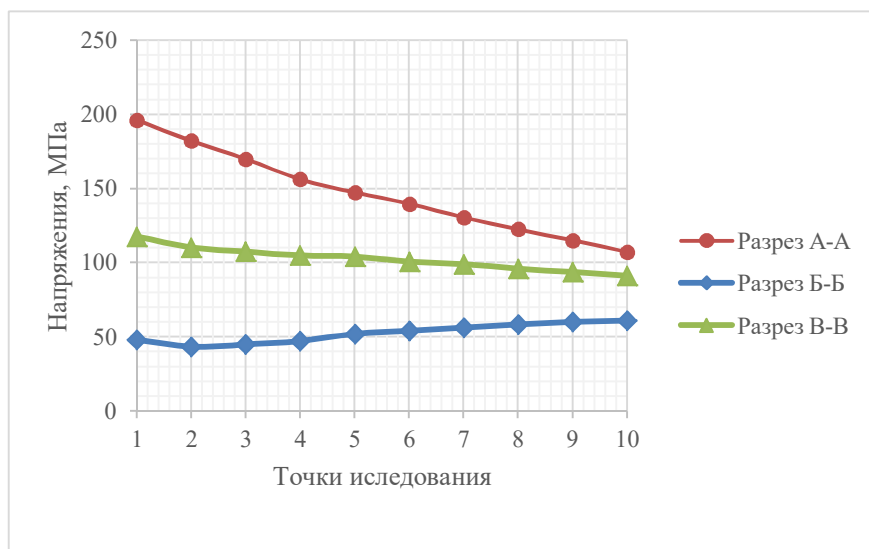


Рис. 5. Распределение напряжений в верхнем тавровом шве в характерных разрезах

Fig. 5. The distribution of stresses in the upper T-joint seam in the characteristic sections

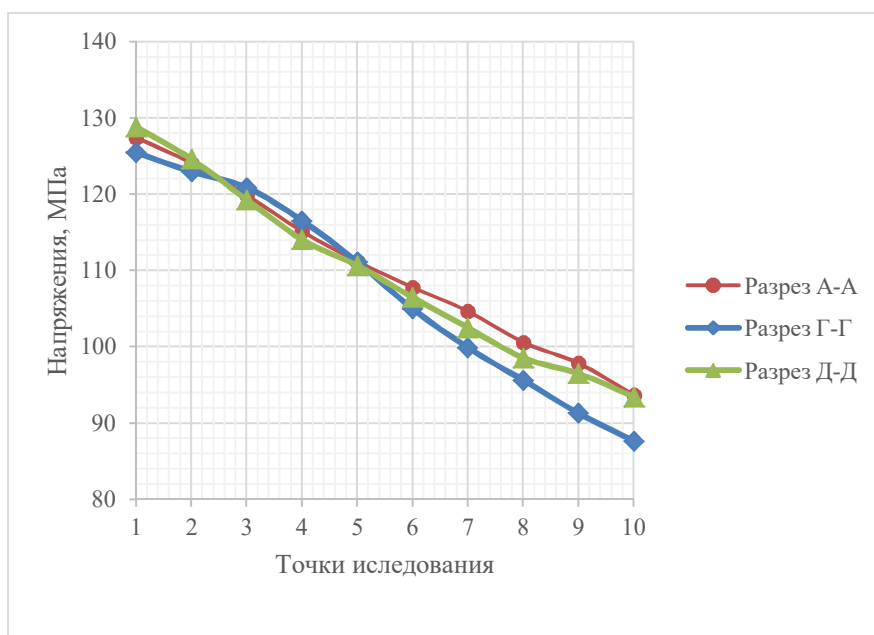


Рис. 6. Распределение напряжений в боковом тавровом шве в характерных разрезах

Fig. 6. The distribution of stresses in the side T-seam in the characteristic sections

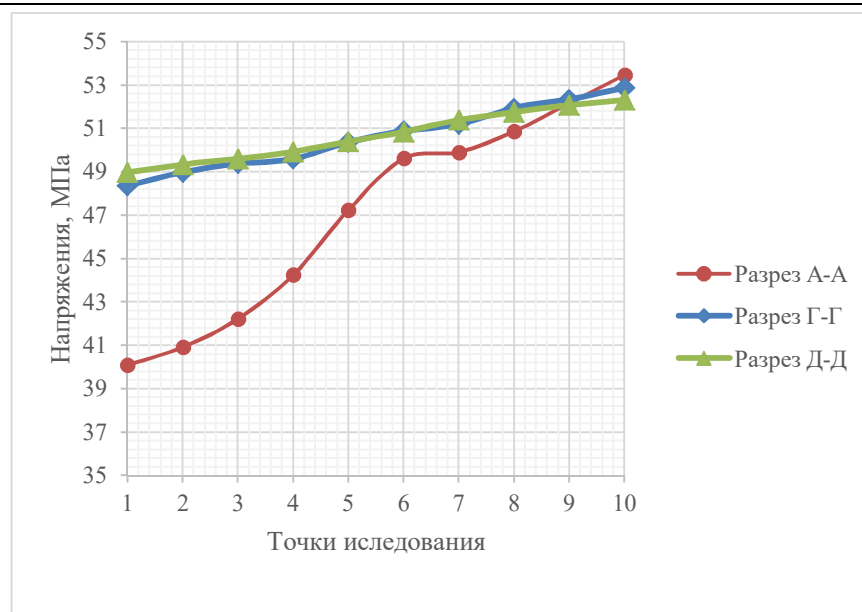


Рис. 7. Распределение напряжений в стыковом шве в характерных разрезах

Fig. 7. The distribution of stresses in the butt joint in the characteristic sections

Выводы

1. Был применен метод конечных элементов для исследования напряженно-деформированного состояния сварных соединений баллона.

2. С помощью программного комплекса АРМ FEM были получены значения напряжений в сварных соединениях в различных разрезах.

3. Установлено, что в различных типах сварных соединений и в различных разрезах распределение значений напряжений неодинаково.

4. Установлено, что максимальное изменение напряжений происходит в тавровом шве, соединяющем обечайку и патрубок, наименьшее – в стыковом шве, соединяющем обечайку и днище.

Список литературы

1. Каплун А.Б., Морозов Е. М, Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиориал, 2003. 272 с.
2. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / под ред. С. А. Куркина. М.: Машиностроение, 1975. 376 с.
3. Алпеева Т. В., Емельянов В. М., Котельников А. А. Роботизированная сварка многосортаментных трубчатых элементов: монография. Курск, 2011. 128 с.
4. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов в расчётах сварных конструкций: монография. Курск, 2014, 125 с.

5. Родионова И. Н., Алпеева Е. В., Котельников А. А. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчёта сварных конструкций методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2013. №4. С. 111-113.
6. Евсигнеева Н. А., Котельников А. А. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной конструкции // Сварочное производство. 2018. №3. С. 45-48.
7. Абышев К. И., Котельников А. А. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной конструкции // Сварочное производство. 2016. №2. С. 3-6.
8. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трёхмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М., 2006. 288 с.
9. Системы автоматизированного проектирования в сварке. Методические указания к выполнению практических работ / сост. М. А. Иванов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 145 с.
10. Бокарев Д. И. Основы систем автоматизированного проектирования в сварке. Воронеж, 2006. 264 с.
11. Программное обеспечение машинной графики / А. А. Котельников, А. Ю. Головенков, А. С. Натаров, В. Ю. Рюмшин. Курск, 2019. 232 с.
12. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Компьютерное моделирование в сварочном производстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2, ч.1. С. 134-138.
13. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Анализ кинематики сборочно-сварочных установок // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2, ч. 3. С. 116-120.
14. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Расчёт на прочность сварных конструкций методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. №2. С. 36-40.
15. Котельников А. А., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной двутавровой балки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. №1. С. 14-16.
16. Котельников А. А., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов при выборе материала сварных конструкций // Сварочное производство. 2015. №2. С. 3-5.
17. Котельников А. А. Родионова И. Н., Алпеева Е. В. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчёта сварных конструкций методом конечных элементов // Заготовительное производство в машиностроении. 2015. №2. С.45-47.

18. Натаров А. С., Котельников А. А. Метод конечных элементов при расчёте остаточных напряжений воздушных баллонов для железнодорожного транспорта // Технология машиностроения. 2019. №7. С. 24-28.

19. Abyshev K. I., Kotelnikov A. A. Calculation welded structures by the finiteelement method // Welding International. 2017. Vol. 31, no. 2. P. 122-125.

References

1. Kaplun A.B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. *ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer: a practical guide]. Moscow, Edional Publ., 2003, 272 p. (In Russ.).

2. Ed. by Kurkin S. A. *Proektirovanie svarnykh konstruktssii v mashinostroenii* [Design of welded structures in mechanical engineering]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1975, 376 p. (In Russ.).

3. Alpeeva T. V., Emelyanov V. M., Kotelnikov A. A. *Robotizirovannaya svarka mnog-osortamentnykh trubchatykh elementov* [Robotic welding of multi-sorted tubular elements]. Kursk, 2011, 128 p. (In Russ.).

4. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. *Primenenie metoda konechnykh elementov v raschetakh svarnykh konstruktssii* [Application of the finite element method in the calculations of welded structures]. Kursk, 2014, 125 p. (In Russ.).

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

6. Evsigneeva N. A., Kotelnikov A. A. *Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi konstruktssii* [Application of the finite element method in the calculation of the welded structure]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production Publ.*, 2018, no.3, pp. 45-48 (In Russ.).

7. Abyshev K. I., Kotelnikov A. A. *Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi konstruktssii* [Application of the finite element method in the calculation of welded structures]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production Publ.*, 2016, no. 2, pp. 3-5 (In Russ.).

8. Zamriy A.A. *Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruktssii v srede APM Structure 3D* [Design and finite element analysis of three-

dimensional structures in the APM Structure 3D environment]. Moscow, 2006, 288 p. (In Russ.).

9. (Eds.) Ivanov M.A. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v svarke. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu prakticheskikh rabot [Computer-aided design systems in welding]. Chelyabinsk, *Publishing Center of SUSU*, 2010, 145 p. (In Russ.).

10. Bokarev D. I. *Osnovy sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya v svarke* [Fundamentals of computer-aided design in welding]. Voronezh, 2006, 264 p. (In Russ.).

11. Kotelnikov A. A., Golovenkov A. Yu., Natarov A. S., Ryumshin V. Yu. Programmnoe obespechenie mashinnoi grafiki [Software machine graphics]. Kursk, 2019, 232 p. (In Russ.).

12. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Komp'yuternoe modelirovaniye v svarochnom proizvodstve [Computer modeling in the welding industry]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2, part 1, pp. 134-138 (In Russ.).

13. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Analiz kinematiki sborochno-svarochnykh ustanovok [Analysis of the kinematics of assembly-welding plants]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012. no. 2, part 3, pp. 116-120 (In Russ.).

14. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Raschet na prochnost' svarnykh konstrukttsii metodom konechnykh elementov [Calculation of the strength of welded structures by the finite element method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2013, no.2, pp. 36-40 (In Russ.).

15. Kotelnikov A. A., Alpeeva E. V. Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi dvutavrovoy balk [The use of the finite element method in the calculation of a welded I-beam]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2014, no.1, pp. 14-16 (In Russ.).

16. Kotelnikov A. A., Alpeeva E. V. Primenenie metoda konechnykh elementov pri vybore materiala svarnykh konstrukttsii [The use of the finite element method when choosing the material of welded structures]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production*, 2015, no. 2, pp. 3-5 (In Russ.).

17. Kotelnikov A. A., Rodionova I. N., Alpeeva E. V. Primenenie funktsional'no-stoimostnogo analiza dlya opredeleniya effektivnosti programm dlya rascheta svarnykh kon-

struktsii metodom konechnykh elementov [The use of functional-cost analysis to determine the effectiveness of programs for the calculation of welded structures by the finite element method]. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii = Procurement in mechanical engineering*, 2015, no. 2, pp. 45-47 (In Russ.).

18. Natarov A.S., Kotelnikov A.A. Metod konechnykh elementov pri raschete ostatoknykh napryazhenii vozdushnykh ballonov dlya zheleznodorozhnogo transporta [The finite element method for calculating the residual stresses of air cylinders for railway transport]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Engineering Technology*, 2019, no.7, pp. 24-28 (In Russ.).

19. Abyshev K. I., Kotelnikov A. A. Calculation welded structures by the finiteelement method. *Welding production*, 2017, vol. 31, no. 2, pp. 122-125.

Информация об авторах / Information about the Authors

Котельников Анатолий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kotelnikov1939@yandex.ru

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

Натаров Артём Сергеевич, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nart_11@mail.ru

Artyom S. Natarov, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: nart_11@mail.ru

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-31-41>

Исследование гранулометрического состава частиц электроэрозионного хромсодержащего порошка, используемого для износостойкой наплавки

Е. В. Агеева ¹✉, С. В. Хардигов ¹, И. А. Морозова ²

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

² ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова», ул. Карла Маркса, 70, г. Курск, 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Целью работы являлось исследование гранулометрического состава электроэрозионного хромсодержащего порошка, пригодного для наплавки покрытий.

Методы. Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы хромсодержащей стали. В качестве рабочей жидкости выбрали углеродсодержащую рабочую жидкость, а именно осветительный керосин. Для получения хромсодержащих порошковых материалов электроэрозионным диспергированием пользовались установкой для ЭЭД токопроводящих материалов. Диспергируемый материал засыпали в эксикатор, который заполнен рабочей жидкостью, а именно осветительным керосином. Гранулометрический состав полученных порошков авторы исследовали по методике диспергирования в жидкости с ультразвуком. Методика исследования (ФР 1.27.2009.06762 «Методика выполнения измерений размера частиц в суспензиях, эмульсиях и аэрозолях в нанометровом и коллоидном диапазонах с использованием эффекта динамического рассеяния света»).

Результаты. Экспериментально установлено, что форма частиц полученного порошкового материала обусловлена тем, в каком виде материал выбрасывается из лунки в процессе ЭЭД. Видно также, что в порошковом материале преобладают частицы, имеющие правильную сферическую или эллиптическую форму. Они получаются кристаллизацией расплавленного материала (жидкой фазы). Частицы, образующиеся при кристаллизации кипящего материала (паровой фазы), имеют неправильную форму, размер на порядок меньше частиц, образующихся из жидкой фазы, и обычно агрегируются друг с другом и на поверхности других частиц. В процессе ЭЭД такие частицы наиболее подвержены химическим и фазовым изменениям.

Заключение. Проведенные исследования гранулометрического состава хромсодержащего порошкового материала, полученного электроэрозионным диспергированием отходов в керосине осветительном при следующих электрических параметрах работы установки ЭЭД: ёмкость разрядных конденсаторов 45 мкФ, напряжение на электродах 100... 110 В, частота следования импульсов генератора 55... 65 Гц, определили средний размер частиц порошкового материала, удельную площадь поверхности. Полученные результаты позволят определить рациональную область их практического применения.

Ключевые слова: хромсодержащие стали; отходы; электроэрозионное диспергирование; порошок; гранулометрический состав.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-945.2019.1).

© Агеева Е. В., Хардигов С. В., Морозова И. А., 2019

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

Для цитирования: Агеева Е. В., Хардилов С. В., Морозова И. А. Исследование гранулометрического состава частиц электроэрозионного хромсодержащего порошка, используемого для износостойкой наплавки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 31-41. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-31-41>.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019

Статья подписана в печать 17.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-31-41>

The Study of Particle Size Distribution of Electroerosion Chrome-Containing Powder, Used for Wear Resistant Surfacing

Yekaterina V. Ageeva ¹ ✉, Sergey V. Hardikov ¹, Irina A. Morozova ¹

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

² Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, 70, Karla Marksa str., Kursk, 305021, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Purpose of research. To study the particle size distribution of electroerosive chrome-containing powder, suitable for surfacing.

Methods. To carry out the planned studies, chrome-containing steel wastes were selected. The carbon-containing working fluid was chosen as the working fluid, namely, lighting kerosene. To obtain chrome-containing powder materials by electroerosive dispersion the device for EED of conductive materials was used. The dispersible material was poured into a desiccator, filled with a working fluid, namely, lighting kerosene. The authors studied the particle size distribution of the obtained powders by the method of dispersion in a liquid with ultrasound. Research technique (FR 1.27.2009.06762 "Methodology for measuring particle size in suspensions, emulsions and aerosols in the nanometer and colloidal ranges using the effect of dynamic light scattering") has been used.

Results. It is experimentally established that the particle shape of the obtained powder material is due to the form in which the material is ejected from the hole during the EED process. It is also seen that particles having a regular spherical or elliptical shape prevail in the powder material. They are obtained by crystallization of the molten material (liquid phase). The particles formed during crystallization of the boiling material (vapor phase) have an irregular shape, an order of magnitude smaller than the particles formed by their liquid phase, and usually agglomerate with each other on the surface of other particles. In the EED process, such particles are most susceptible to chemical and phase changes.

Conclusion. Studies of the particle size distribution of chrome-containing powder material obtained by electroerosive dispersion of waste in lighting kerosene under the following electrical parameters of the operation of the EED unit: capacity of discharge capacitors 45 μ F, voltage at the electrodes 100 ... 110 V, pulse repetition rate of the generator 55 ... 65 Hz determine the average particle size of the powder material and the specific surface area. The results will allow us to determine the rational area of their practical application.

Keywords: chrome-containing steels; waste; electroerosion dispersion; powder; particle size distribution.

Acknowledgements: *The Work was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and graduate students (SP-945.2019.1).*

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

For citation: Ageeva Y. V., S Hardikov. V., Morozova I. A. The Study of Particle Size Distribution of Electroerosion Chrome-Containing Powder, Used for Wear Resistant Surfacing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 31-41 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-31-41>.

Received 03.06.2019

Accepted 17.07.2019

Введение

Наплавление металлического порошкового материала применяется для восстановления формы и работоспособности поврежденных и изношенных деталей машин и механизмов, формирования упрочняющих покрытий металлического порошкового материала на поверхности восстанавливаемых изделий, а также создания биметаллических структур. По своей сути наплавка — это один из видов сварочных технологий. Для ремонта и защиты поверхностей восстанавливаемых изделий с помощью слоя расплавленного порошкового материала применяют несколько видов наплавки, которые отличаются друг от друга способами расплавления материала и видом сварки: электродуговые, газопламенные, плазменные, лазерные, индукционные и пр. С помощью данной технологии возможно наплавлять на рабочие плоскости стальных конструкций металлические порошковые материалы, которые имеют разный химический состав, в том числе медь, бронзу, чугун, а также никелевые, кобальтовые и хромовые сплавы.

Технология наплавления металлического порошкового материала позволяет добиться надежного сцепления наносимого порошкового материала с восстанавливаемой деталью, а также получить требуемые физические и химические характеристики наплавленного слоя. Это достигается следующими факторами: качественной подготовкой базового изделия; точным соблюдением технологических режимов; правильным подбором сварочных материалов. Сущность наплавления металлического порошкового материала состоит в равномерном нанесении узких полос порошкового материала на восстанавливаемую деталь так, чтобы соседние проплавленные полосы объединились в сплошной металлический слой заданной толщины. Свойства полученных покрытий напрямую зависят от качества используемых материалов. Одним из таких материалов является металлический порошок, полученный из хромосодержащей стали. Порошки с высоким содержанием хрома могут использоваться для получения износостойких и термостойких покрытий [1–6].

Существует несколько способов получения таких порошковых материалов. Наиболее перспективным методом получения порошковых материалов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД), который отличается экологической чистотой процесса и относительно небольшими затратами энергии [7–12].

Для того, чтобы разработать технологию практического применения порошкового хромсодержащего материала, полученного из отходов хромсодержащей стали, и провести оценку эффективности его использования, требуется проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

Целью настоящей работы являлось следующее: провести исследование гранулометрического состава частиц порошкового хромсодержащего материала, который получен методом электроэрозионного диспергирования отходов хромсодержащей стали в углеродсодержащей рабочей жидкости.

Материалы и методы

Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы хромсодержащей стали. В качестве рабочей жидкости выбрали углеродсодержащую рабочую жидкость, а именно осветительный керосин. Для получения порошкового материала методом электроэрозионного диспергирования использовали установку для ЭЭД токопроводящих материалов. Отходы загружали в реактор, заполненный рабо-

чей жидкостью – керосином осветительным, процесс проводили при следующих электрических параметрах: ёмкость разрядных конденсаторов 45 мкФ, напряжение на электродах 100...110 В, частота следования импульсов генератора 55...65 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение материала отходов с образованием дисперсных частиц порошкового материала [13–20].

При помощи растрового электронного микроскопа QUANTA 600 FEG провели непосредственный анализ частиц порошка с достаточно высоким разрешением. QUANTA 600 FEG – (производитель FEI (Голландия)) – электронно-ионный сканирующий микроскоп с электроннолучевой колонной, оснащенной вольфрамовым катодом, ускоряющее напряжение от 200 эВ до 30 кВ, разрешение (при оптимальном WD) 3,5 нм при 35 кВ; 3,5 нм при 30 кВ в режиме естественной среды; < 15 нм при 1 кВ в режиме низкого вакуума. Ионная колонна Magnum с галлиевым жидкометаллическим источником ионов, ускоряющее напряжение от 5 кВ до 30 кВ, разрешение 20 нм. Система оснащена 5-осевым моторизованным столиком 50x50x25 мм, газовыми инжекционными системами для напыления проводников и диэлектриков, а также для травления образцов.

Порошковые материалы, полученные методом электроэрозионного диспергирования в керосине из отходов

хромсодержащих сталей, проанализировали с помощью лазерного анализатора размеров частиц «Analysette 22 NanoТес» для определения распределения полученных частиц порошкового материала по размерам.

Результаты и их обсуждение

Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью детек-

тора вторичных электронов были исследованы частицы образца порошкового материала (рис. 1) [12].

На снимке видно, что частицы порошкового материала имеют в основном сферическую форму. Форма частиц порошкового материала обусловлена тем, в каком виде материал выбрасывается из лунки в процессе ЭЭД.

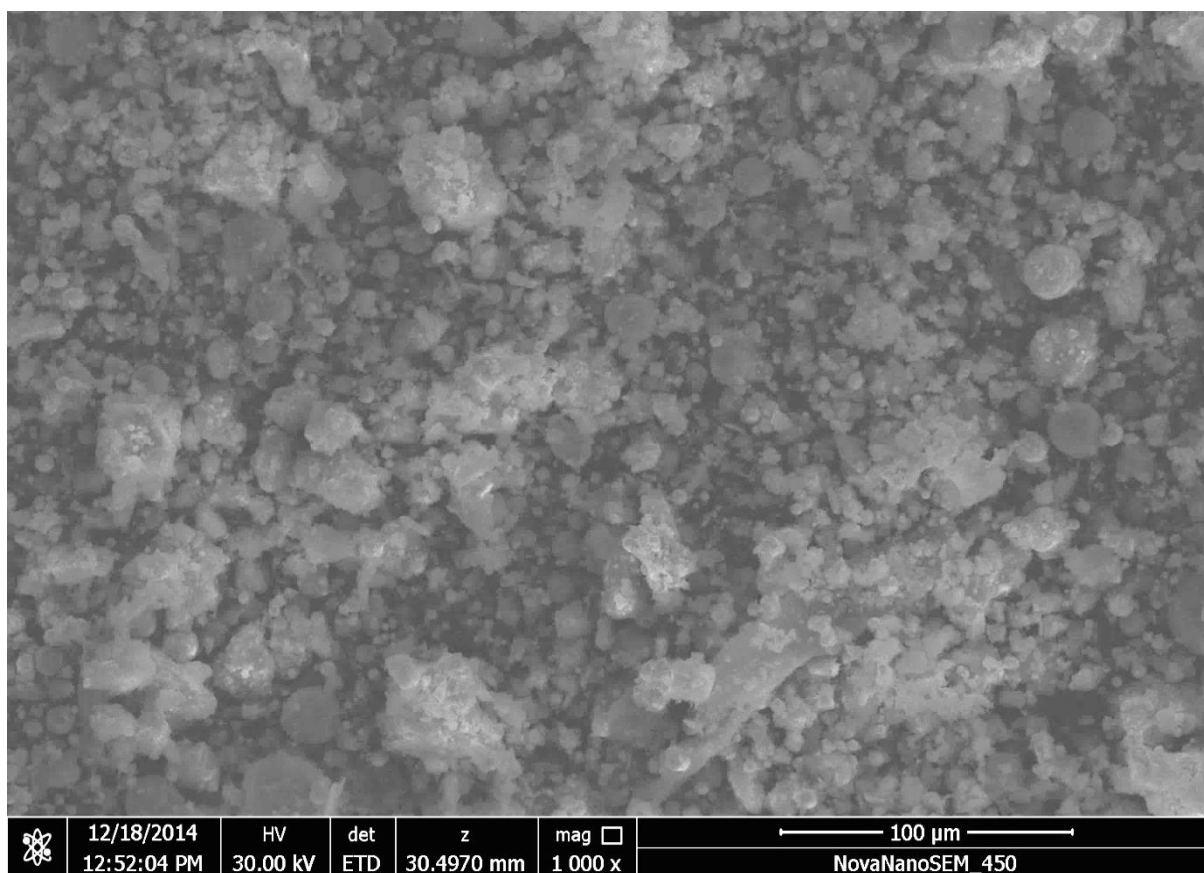


Рис. 1. Снимок с РЭМ частиц порошка, полученного ЭЭД

Fig. 1. A picture of the REM particles of the powder obtained by EED

Видно также, что в порошковом материале преобладают частицы, имеющие правильную сферическую или эллиптическую форму. Они получаются кристаллизацией расплавленного материала (жидкой фазы). Частицы, образу-

ющиеся при кристаллизации кипящего материала (паровой фазы), имеют неправильную форму, размер на порядок меньше частиц, образующихся из жидкой фазы, и обычно агломерируются друг с другом и на поверхности других

частиц. В процессе ЭЭД такие частицы наиболее подвержены химическим и фазовым изменениям.

Результаты измерения размера частиц полученного порошкового материала представлены на рисунке 2 [12].

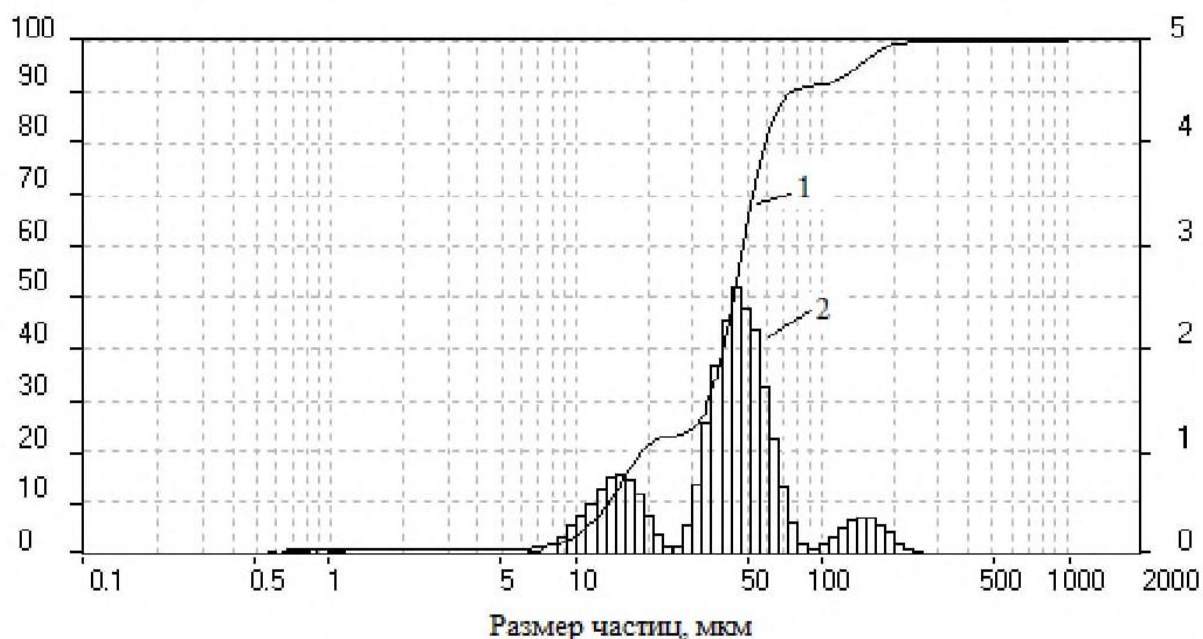


Рис. 2. Распределение по размерам микрочастиц порошка: 1 – интегральная кривая, 2 – гистограмма

Fig. 2. Size distribution of powder microparticles: 1 – integralcurve, 2 – histogram

Установлено, что средний размер частиц составляет 49,33 мкм, арифметическое значение – 49,328 мкм, удельная площадь поверхности – 2732,76 см²/см³.

Выводы

В ходе проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование гранулометрического состава хромсодержащего порошкового материала, полученного электроэрозионным диспергированием отходов в керосине осветительном при следующих электрических параметрах: ёмкость разрядных конденсаторов 45 мкФ, напряжение на электродах 100... 110 В,

частота импульсов генератора 55... 65 Гц определены: средний размер частиц, удельная площадь поверхности, которые позволят определить рациональную область их практического применения.

В результате, на основании полученных результатов можно сделать следующий вывод: хромсодержащий порошковый материал, полученный методом электроэрозионного диспергирования хромсодержащей стали в углеродсодержащей рабочей жидкости, может повторно использоваться при восстановлении и упрочнении деталей машин, в том числе и при износостойкой наплавке.

Список литературы

1. Safdar A., Wei L.Y., Snis A. Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V // *Materials Characterization*. 2012. Vol. 65. P. 8–15.
2. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V / A. Safdar, H.Z. He, L.Y. Wei et al. // *Journal of Rapid Prototyping*, 2012. Vol. 18 (5). P. 401–408.
3. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213 (12). P. 2109–2118.
4. Loeber L., Biamino S., Ackelid U. et al. Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides // *Conference paper of 22nd International symposium “Solid freeform fabrication proceedings”*, University of Texas, Austin, 2011. P. 547–556.
5. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 776–781.
6. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // *International Materials Reviews*. 2012. Vol. 57 (3). P. 133–164.
7. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V // *Materials & Design*, 2012. Vol. 35. P. 120–125.
8. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and microstructure characterization of selective laser melted FeAl intermetallic parts // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 206. P. 4704–4709.
9. Wang Z., Guana K., Gao M. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 513. P. 518–523.
10. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2016. Т. 80. № 4. С. 408.
11. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2013. № 2-2. С. 90–94.
12. Агеев Е.В., Хардигов С.В. Рентгеноспектральный анализ порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в ке-

росине осветительном // Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов: матер. XII Междунар. науч. конф. / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2015. С. 17–20.

13. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2014. № 78. С. 31.

14. Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров И.Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 7. С. 38-46.

15. Моделирование процесса спекания изделий из низкотемпературной керамики, формируемых аддитивными технологиями / В.Н. Лейцин, С.В., Пономарев М.А. Дмитриева, И.В., Ивонин И.М. Тырышкин // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 4. С. 21-27.

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

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

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

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

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

Reference

1. Safdar A., Wei L. Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti–6Al–4V. *Characterization Of Materials*, 2012, vol. 65, pp. 8-15.

2. Safdar A., He H. Z., Wei L. Y., et al. Influence of technological parameters and thickness settings on surface roughness of EBM produced by Ti-6Al-4V. *Journal of Rapid Prototyping*, 2012, vol. 18 (5), pp. 401-408.

3. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials obtained by electron beam melting (EBM) of two different ti-6Al-4V powder fractions. *Journal of materials processing technology*, 2013, vol. 213 (12), pp. 2109-2118.

4. Loeber L., Biamino S., Ackelid U. et al. Comparison of selective laser and electron beam melts of titanium Aluminides. Conference paper of the 22nd International Symposium "Solid freeform fabrication proceedings", University of Texas, Austin, 2011, pp. 547-556.

5. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: investigation of microstructure and mechanical properties. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 776-781.

6. GU D. D., Miners W., Wissenbach K. R. Poprawe laser additive manufacturing of metal parts: materials, processes and mechanisms. *International Material Reviews*, 2012, vol. 57 (3), pp. 133-164.

7. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Influence of technological parameters on the microstructure and mechanical properties of selective laser melt Ti6Al4V. *Materials&Design*, 2012, vol. 35, pp. 120-125.

8. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and characterization of the microstructure of selective laser-melted FeAl intermetallic parts. *Technology of surfaces and coatings*, 2012, vol. 206, pp. 4704-4709.

9. Wang Z., Guana K., Gaoa M. Microstructure and mechanical properties of the deposited-IN718 by selective laser melting. *Journal of alloys and compounds*, 2012, vol. 513, pp. 518-523.

10. Kovalevo B. Modelirovanie protsessov v tekhnologiyakh lazernogo additivnogo izgotovleniya ob"emnykh metalloizdelii [Modeling of processes in technologies of additive laser manufacturing of bulk metal products]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series physical*. 2016, vol. 80, no. 4, p. 408 (In Russ.).

11. Smirnov In.V., Shaikhutdinova E. F. Vnedrenie additivnykh tekhnologii izgotovleniya detalei v seriinoe proizvodstvo [Introduction of additive manufacturing technologies of parts in mass production]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan state technical University. A. N. Tupolev*. 2013, no. 2-2, pp. 90-94 (In Russ.).

12. Ageev E. V., Khardikov S. V. [X-ray analysis of the powder obtained by electroerosion dispersion of waste-bearing steel in kerosene lighting]. *Innovatsii v metalloobrabotke: vzglyad molodykh spetsialistov. Mater. XII Mezhdunar. nauch. konf.* [Innovations in Metal-

working: a view of young professionals: mater. XII mezhdunar. scientific]. Kursk, 2015, pp. 17-20 (In Russ.).

13. Chumakov D. M. Perspektivy ispol'zovaniya additivnykh tekhnologii pri sozdanii aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki [Prospects for the use of additive technologies in the creation of aviation and rocket and space technology]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2014, no. 78, pp. 31 (In Russ.).

14. Grigoryants A. G., Novichenko D. Yu., Smurov Yu. Lazernaya additivnaya tekhnologiya izgotovleniya pokrytii i detalei iz kompozitsionnogo materiala [Laser additive manufacturing technology of coatings and parts from composite material]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Engineering*, 2011, is. 7, pp. 38-46 (In Russ.).

15. Leucine V.N., Ponomarev S. V., Dmitrieva M. A., Ivonin V., Tyryshkin M. Modelirovanie protsessa spekaniya izdelii iz nizkotemperaturnoi keramiki, formiruemykh additivnymi tekhnologiyami [Modeling of the sintering process of products from low-temperature ceramics formed by additive technologies]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical mesomechanics*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 21-27 (In Russ.).

16. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., With Gulidin.S., Ageev E. V., Gorokhov A. Fazovyi sostav chastits poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem splava VK8 v butilovom spirte [Phase composition of powder particles obtained by electroerosive dispersion of VK8 alloy in butyl alcohol]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25 (In Russ.).

17. Ageev E. V., Gadlov V.N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tverdykh spлавov – perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoi tekhniki [Powders, obtained by electroerosion dispersion of waste of hard alloys - promising material for the recovery of parts of automotive engineering]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

18. Ageev E. V., Ageev E. V., Chaplygin Y., Gorokhov A. Razmernye kharakteristiki bronzovogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v vode [Sizing bronze spark erosion powder obtained in water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 30-35 (In Russ.).

19. Ageev E. V., Latypov R. A. Poluchenie i issledovanie zagotovok tverdogo splava iz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem vol'framsoderzhashchikh otkhodov [Preparation and study of solid alloy blanks from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*.

Tsvetnaya metallurgiya = Proceedings of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy, 2014, no. 5, pp. 50-53 (In Russ.).

20. Ageev E. V., Latypov R. A. Production and research of carbide blanks from powders obtained by electroerosion dispersion of tungsten-containing waste. *Russian journal of non-ferrous metals*. 2014, vol. 55, is.6, pp. 577-580.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Ekaterina V. Ageeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Хардигов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, Курск, Российская Федерация
e-mail: hardikov1990@mail.ru

Sergey V. Hardikov, Candidate of Engineering Sciences, Department of Automobiles and Motor Vehicles, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: hardikov1990@mail.ru

Морозова Ирина Анатольевна, магистрант, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия», Курск, Российская Федерация,
e-mail: morozova_ira46@mail.ru

Irina A. Morozova, Master's Degree Student, Kursk State Agricultural Academy, Kursk, Russian Federation
e-mail: morozova_ira46@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-42-56>

Исследование колебаний конвертоплана в вертикальной продольной плоскости

С.Ф. Яцун¹, Б.В. Лушников¹, О.В. Емельянова¹✉, С.П. Стуканева¹

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

✉ e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В статье проведено математическое моделирование и исследование движения конвертоплана, выполненного по квадрокоптерной схеме, в переходных режимах, под которым будем понимать момент перехода аппарата из вертикального полета в горизонтальный и обратно, осуществляемый за счет изменения направления вектора тяги несущих винтов. Такие задачи изучены недостаточно, а именно, при выполнении таких маневров может происходить значительное отклонение конвертоплана от заданной траектории, а при определенных условиях потеря его управляемости и падение. Поэтому целью данной статьи является изучение основных закономерностей движения в переходных режимах и особенностей алгоритмов управления на основе математических моделей, описывающих управляемое движение малогабаритных беспилотных конвертопланов.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы теоретической механики и механики роботов, матричный подход к определению радиус-векторов и их производных для основных точек звеньев механизма. Достоинствами матричного метода являются простота, универсальность правил при выборе осей координат для формирования матриц перехода. При изучении закономерностей движения конвертоплана использовались методы математического моделирования динамических систем с учетом свойств электроприводов, кинематики вращения корпуса, алгоритмов формирования управляющих напряжений, и внешних периодических возмущений. При разработке управляющих алгоритмов использовались методы теории автоматического управления. Управление осуществлялось программно с помощью ПИД регулятора, позволяющего минимизировать фактические и требуемые значения управляемой величины.

Результаты. Выявлено, что при отклонении несущих винтов возникают связанные колебания, определена область параметров регулятора, при которых эти колебания в переходный период затухают и конвертоплан восстанавливает равновесное состояние. Так же выявлены зависимости отклонения реальной позиции аппарата от заданной по координатам ОХ, ОУ при изменении значений коэффициента дифференциальной и пропорциональной составляющих регулятора САУ соответственно. Характер изменения графиков свидетельствует о существенном влиянии коэффициентов регулятора на характер переходного процесса в части амплитудных значений ошибки и времени переходного процесса.

Заключение. Разработана математическая модель и выполнено математическое моделирование движения конвертоплана в переходных режимах движения. Показано, что управление углом тангажа, а так же движение в вертикальной плоскости состоят из нескольких контуров пропорционально-дифференциального управления, поэтому необходимо, что бы каждый контур имел схему, препятствующую значительному отклонению управляемых параметров от заданных значений, при которых обеспечивается устойчивый переход конвертоплана в горизонтальное положение. Определены параметры минимизации средней квадратической ошибки.

Ключевые слова: конвертоплан-квадрокоптер; обобщенные координаты; переходные режимы; связанные колебания; корректирующее воздействие.

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

Для цитирования: Исследование колебаний конвертоплана в вертикальной продольной плоскости / С.Ф. Яцун, Б.В. Лушников, О.В. Емельянова, С.П. Стуканева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 42-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-42-56>.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019

Статья подписана в печать 18.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-42-56>

Study of Tiltrotor Oscillations in a Vertical Longitudinal Plane

Sergei F. Jatsun ¹, Boris V. Lushnikov ¹, Oksana V. Emelyanova ¹ ✉, Svetlana P. Stukaneva ¹

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

✉ e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The article provides mathematical simulation and a study of the motion of the tiltrotor, constructed according to the quadcopter scheme, in transient modes. Under these modes, the moment of transition of the device from the vertical flight to the horizontal flight and back, performed due to changing the direction of the thrust vector of the rotors is meant. These issues are not sufficiently studied, including the fact that, when performing such maneuvers, a significant deviation of the tiltrotor from the given trajectory can occur, and under certain conditions, the loss of its controllability and fall can happen. Therefore, the purpose of this paper is to study the basic patterns of motion in transient modes and features of control algorithms based on mathematical models describing the controlled motion of small unmanned tiltrotors.

Methods. To solve these problems, methods of theoretical mechanics and mechanics of robots, a matrix approach to the determination of the radius-vectors and their derivatives for the main points of the mechanism pieces were used. The advantages of the matrix method are simplicity, universality of the rules for selecting coordinate axes for transition matrices generation. Studying the patterns of the motion of the tiltrotor, methods of mathematical simulation of dynamic systems considering the properties of electric drives, kinematics of rotation of the body, algorithms for the formation of control voltages, and external periodic disturbances, were used. When developing control algorithms, methods of the automatic control theory were applied; the control was performed applying software, using PID control allowing minimization of the actual and required values of the controlled variable.

Results. It is revealed that in case of the deviation of the rotor, coupled oscillations occur; the range of parameters of the control, at which these oscillations in the transition period are damped and the tiltrotor recovers equilibrium, are determined. Also, there were revealed dependences of deviations of the actual position of the device from the set position in coordinates Ox , Oy , when the values of the coefficient of differential and proportional components of the ACS control change respectively. The pattern of the change of the diagrams indicates a significant influence of the control coefficients on the pattern of the transition process in terms of the amplitude values of the error and the time of the transition process.

Conclusion. *A mathematical model is developed and mathematical simulation of the tiltrotor motion in transient modes is performed. It is shown that the control of the pitch angle, as well as the motion in the vertical plane consist of several loops of proportional-differential control, so it is necessary for each loop to have a circuit that prevents a significant deviation of the controlled parameters from the specified values, at which a stable transition of the tiltrotor to the horizontal position is provided. The parameters of the mean square error minimization are determined.*

Keywords: *tiltrotor-quardcopter; generalized coordinates; transient modes; coupled oscillations; corrective action.*

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

For citation: Jatsun S. F., Lushnikov B. V., Emelyanova O. V., Stukaneva S. P. Study of Tiltrotor Oscillations in a Vertical Longitudinal Plane. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 42-56 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-4-42-56](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-42-56).

Received 03.06.2019

Accepted 18.07.2019

Введение

Последние годы широкое распространение получили мультироторные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1-9]. В то же время, как показали экспериментальные исследования, для эффективного использования таких устройств важно обеспечить достаточную длительность нахождения БПЛА в воздухе. Одним из путей повышения этого важного показателя является переход классических мультироторов к конвертопланам, которые позволяют использовать как вертолетный режим движения при взлете и зависании, так и самолетный, при полете в горизонтальной плоскости. Такие устройства отличаются от самолетных схем повышенной маневренностью и скоростными характеристиками, а по отношению к мультироторам характеризуются пониженным энергопотреблением в горизонтальном полете, что позволяет осуществлять выполнение разведывательных операций, транспортных работ и

мониторинга окружающей среды на удалённых и труднодоступных территориях [4, 5].

Несмотря на все более широкое распространение конвертопланов [4, 5, 10, 11-15], управление автономным полетом по заданной траектории особенно в режимах перехода из вертикального полета в горизонтальный и обратно (так называемые, переходные режимы, осуществляемые за счет изменения направления вектора тяги) изучены недостаточно, а именно при выполнении таких маневров может происходить значительное отклонение конвертоплана от заданной траектории, а при определенных условиях потеря управляемости аппарата и его падение [10]. Поэтому целью данной статьи является изучение основных закономерностей движения в переходных режимах и особенностей алгоритмов управления на основе математических моделей, описывающих управляемое движение малогабаритных беспилотных конвертопланов.

Материалы и методы

Схема конвертоплана-квадрокоптера приведена на рис. 1. Рассмотрим движение конвертоплана в неподвижной декартовой системе координат $OX_0Y_0Z_0$, пусть $CX_1Y_1Z_1$ ($i=1-4$) – подвижные системы координат, проходящие через центр масс корпуса аппарата C . Ориентацию корпуса в пространстве задают самолетные углы рысканья ψ ,

тангажа θ и крена φ . Конвертоплан состоит из четырех управляемых винтов 1-4 с изменяемыми векторами тяги, электроприводы которых реализованы на основе бесколлекторных электродвигателей, а также корпуса (фюзеляжа) 5 на котором закреплены блок питания и плата управления, электрически связанные с приводами вращения винтов [11, 12, 15, 16].

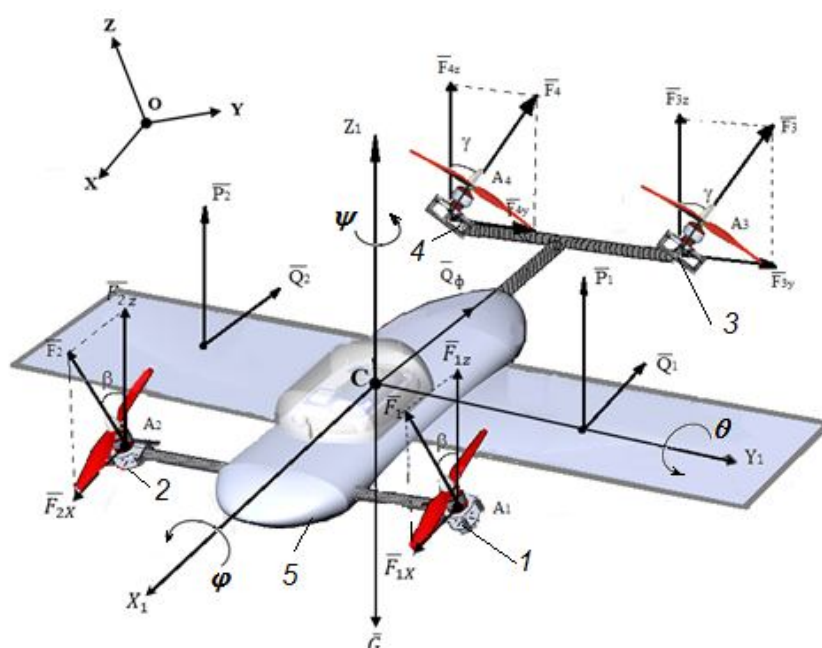


Рис.1. Расчетная схема конвертоплана

Fig.1. Tiltrotor design scheme

Отклонение векторов тяги поворотных приводов 1,2 на угол β , осуществляется в плоскостях, которые параллельны плоскости CX_1Z_1 . Угол β , может изменяться от 0 до 90° . Приводы 3,4 поворачиваются на угол $\gamma = \pm 90^\circ$ в плоскости, параллельной CY_1Z_1 .

Далее будем обозначать символами (0) и (1) векторы, определённые в си-

стемах координат $OX_0Y_0Z_0$ и $CX_1Y_1Z_1$, соответственно. Положение центра масс конвертоплана задается вектором $\vec{r}_{OC}^{(0)} = [x, y, z]^T$, а ориентация конвертоплана в пространстве – вектором $\vec{\alpha} = [\varphi, \psi, \theta]^T$ [4,10]. Таким образом, вектор $\vec{r}^{(0)} = [\vec{r}_{OC}^{(0)}, \vec{\alpha}]^T$ полностью определяет пространственное расположение конвертоплана.

Абсолютную угловую скорость вращения роторов определяем как [17]:

$$\bar{\Omega}_i = \bar{\omega}_C + \bar{\omega}_i, \quad (1)$$

где $\bar{\Omega}_i$ – абсолютная угловая скорость вращения i -ого ротора в подвижной системе координат; $\bar{\omega}_C, \bar{\omega}_i$ – векторы угловых скоростей вращения корпуса конвертоплана и i -ого ротора.

Абсолютные скорости центров масс роторов (точек A_i) можно представить, как [17]:

$$\bar{v}_{A_i}^{(0)} = \bar{v}_C^{(0)} + \dot{T}_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)}, \quad (2)$$

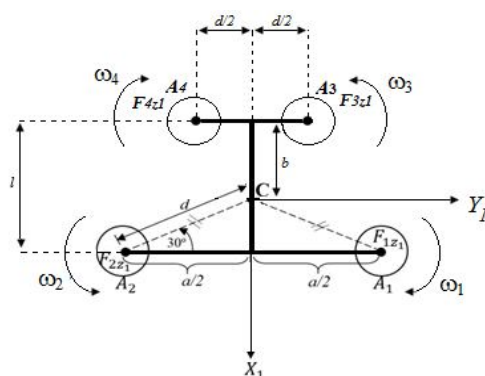


Рис.2. Геометрические параметры конвертоплана, определяющие расположение центров масс корпуса конвертоплана C и роторов A_i : 1–4 – несущие винты; 5 – фюзеляж

Fig.2. Geometric parameters of the tiltrotor, determining the location of the centers of mass of the tiltrotor body C and rotors A_i : 1–4 – rotors; 5 – fuselage

Определение сил, действующих на конвертоплан

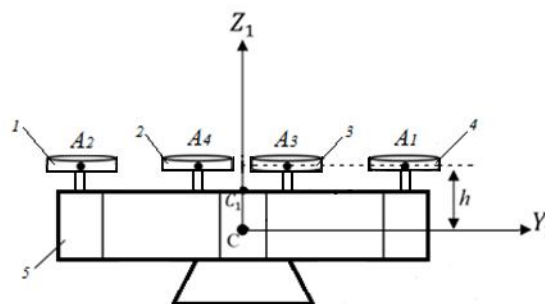
Силы, приложенные к конвертоплану (рис.1), можно разделить на силы, задаваемые в абсолютной системе координат $OX_0Y_0Z_0$: сила тяжести $\bar{G}$, приложенная в центре масс C , и силы, определенные в подвижной системе координат $CX_1Y_1Z_1$: силы, создаваемые винтами $\bar{F}_i$, приложенные в центре

где T_{10} – матрица перехода из (1) в (0) систему координат [4, 18, 19]; $\bar{r}_{CA_i}^{(1)}$ – радиус-векторы для точек A_i в соответствии с рис.2 имеют вид:

$$\bar{r}_{CA_1}^{(1)} = \begin{bmatrix} d/2 \\ a/2 \\ h \end{bmatrix}, \quad \bar{r}_{CA_2}^{(1)} = \begin{bmatrix} d/2 \\ -a/2 \\ h \end{bmatrix},$$

$$\bar{r}_{CA_3}^{(1)} = \begin{bmatrix} -b \\ d/2 \\ h \end{bmatrix}, \quad \bar{r}_{CA_4}^{(1)} = \begin{bmatrix} -b \\ -d/2 \\ h \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь a, b, c, d, h – геометрические размеры конвертоплана.



масс роторов $\bar{A}_i$; аэродинамические силы, действующие на поверхность крыла Q_j ($j=1,2$), называемые силой лобового сопротивления, направленные в сторону, противоположную оси CX_1 , и силу Q_ϕ , действующую на фюзеляж, а так же подъемные силы крыла $\bar{P}_j$ и фюзеляжа $\bar{P}_\phi$.

Приблизленно модуль силы тяги винта определим как [19]:

$$\bar{F}_i^{(1)} = \bar{b}_i^T \bar{\omega}_i |\bar{\omega}_i|, \quad (4)$$

где $\bar{b}_i = (b_x \ b_y \ b_z)^T$ – аэродинамический коэффициент, модуль которого

$$b_i = \frac{c_T \rho S_H R^2}{2} [5, 16, 17].$$

Векторы силы тяги винтов, подъемной силы крыла и силы сопротивления соответственно в нулевой системе координат можно определить по следующим формулам [16, 10, 19, 12, 13]:

$$\begin{aligned} \bar{F}_i^{(0)} &= T_{i0} \cdot \bar{F}_i^{(1)}, \\ \bar{P}_j^{(0)} &= T_{j0} \cdot \bar{P}_j^{(1)}, \quad \bar{Q}_j^{(0)} = T_{j0} \cdot \bar{Q}_j^{(1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Модули подъемной силы крыла $P_j^{(1)}$ и силы сопротивления $\bar{Q}_j^{(1)}$ будем определять как [16, 10]:

$$\begin{aligned} P_j^{(1)} &= \frac{c_L \rho S V^2}{2} = k V^2, \\ Q_j^{(1)} &= \frac{c_D \rho S V^2}{2} = \mu_x V^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха; c_L , c_D – коэффициенты сил подъемной и сопротивления, зависящие от геометрии крыла; S – площадь крыла; V – скорость набегающего воздушного потока.

Математическая модель движения конвертоплана

Система дифференциальных уравнений, описывающих изменение обобщенных координат, определяющих положение центра масс конвертоплана в пространстве под действием сил тяги винтов, подъемной силы, сил сопротивления и сил веса, описана в [1-3, 5, 12-15, 20, 19].

Условия перехода конвертоплана из вертикального полета в режим горизонтального полета сформулируем следующим образом:

Пусть при $t=0$ $z^* = H$, $\dot{z}^* = 0$, $\ddot{z}^* = 0$, $\gamma = 0$, $\beta = \sum a_i t^i$, $0 < \beta < \frac{\pi}{3}$.

Для заданных граничных условий закон изменения угла β за время t_l имеет вид

$$\beta = \beta(t) = \frac{\pi}{t_1^2} t^2 - \frac{3\pi}{3t_1^3} t^3, \quad (7)$$

а уравнение заданного движения по координате OX_0 :

$$x^*(t) = \sum_{i=0}^3 D_i^* t^i, \quad (8)$$

тогда скорость и ускорение заданного движения определим как:

$$\begin{aligned} \dot{x}^*(t) &= \sum_{i=1}^3 i D_i^* t^{i-1}, \\ \ddot{x}^*(t) &= \sum_{i=2}^3 i(i-1) D_i^* t^{i-2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где D_i^* – постоянные, определяемые из граничных условий: при $t=0$ $x_0^* = 0$, $\dot{x}^* = 0$, при $t=t_l$ $x_0^* = 0$, $\dot{x}^* = l$, где l – длина пути вдоль оси x .

С учетом этого уравнение заданного движения по координате OX_0 будет иметь вид:

$$x^* = x^*(t) = \frac{3l}{t_1^3} t^3 - \frac{2l}{t_1^2} t^2. \quad (10)$$

Считаем, что САУ конвертоплана обеспечивает выполнение условий: $\varphi=0$, $\psi=0$.

Дифференциальные уравнения заданного движения вдоль осей OX_0 , OZ_0 представим в виде [10]:

$$\ddot{x}^* = \frac{1}{M} \sum_1^4 F_{ix}^*; \quad \ddot{z}^*(t) = \frac{1}{M} \left[\left(\sum_1^4 F_{iz}^* - Mg \right) + P(\dot{x}^*) \right]. \quad (11)$$

Здесь $P(\dot{x}) = \mu_x \dot{x}$ – подъёмная сила крыла, $M = \sum m_k$ – масса аппарата.

Дифференциальные уравнения реального движения представим в виде

$$\ddot{x}^* = \frac{1}{M} \sum_1^4 F_{ix}; \quad \ddot{z}^* = \frac{1}{M} (\sum_1^4 F_{iz} - Mg) + P(\dot{x}). \quad (12)$$

Вычтем из (11) (12) и получим:

$$\ddot{x}^*(t) - \ddot{x}(t) = \frac{1}{M} (\sum_1^4 F_{ix}^* - \sum_1^4 F_{ix}), \quad (13)$$

$$\ddot{z}^*(t) - \ddot{z}(t) = \frac{1}{M} (k_{dz} \Delta \dot{z} - k_{pz} \Delta z + P(\Delta \dot{x})), \quad (14)$$

где k_{pz} , k_{dz} – коэффициенты соответственно пропорционального и дифференциального регулятора, $P(\Delta \dot{x}) = P(\dot{x}^*) - P(\dot{x})$.

Пусть корректирующее воздействие вдоль оси OX_0 : $\Delta \sum_1^4 F_{ix}$ определяется по формуле, что соответствует пропорционально-дифференциальному регулятору:

$$\Delta \sum_1^4 F_{ix} = -k_{px} \Delta x + k_{dx} \Delta \dot{x}. \quad (15)$$

Тогда:

$$\ddot{x} + \frac{k_{dx}}{M} \dot{x} - \frac{k_{px}}{M} x = \ddot{x}^* + \frac{k_{dx}}{M} \dot{x}^* - \frac{k_{px}}{M} x^*, \quad (16)$$

или с учетом (11) уравнение (18) будет иметь вид

$$\ddot{x} + \frac{k_{dx}}{M} \dot{x} - \frac{k_{px}}{M} x = \sum_{i=2}^3 i(i-1) D_i^* t^{i-2} + \frac{k_{dx}}{M} \sum_{i=1}^3 i D_i^* t^{i-1} - \frac{k_{px}}{M} \sum_{i=0}^3 D_i^* t^i. \quad (17)$$

Решение уравнения представим в виде

$$x = e^{-n_x t} \left(A_{11} e^{\sqrt{K_{px}} t} + A_{12} e^{-\sqrt{K_{px}} t} \right) + \sum_{i=0}^3 E_i^* t^i, \quad (18)$$

$$\text{где } n_x = \frac{k_{dx}}{2M}, \quad K_{px} = \frac{k_{px}}{M}.$$

Коэффициенты A_{11} , A_{12} определим из начальных условий, а E_i^* найдем из уравнения:

$$\sum_{i=2}^3 i(i-1) E_i^* t^{i-2} + k_{dx} \sum_{i=1}^3 i E_i^* t^{i-1} - k_{px} \sum_{i=0}^3 E_i^* t^i = \sum_{i=0}^3 \delta_i^* t^i, \quad (19)$$

$$\text{где } \sum_{i=0}^3 \delta_i^* t^i = \sum_{i=2}^3 i(i-1) D_i^* t^{i-2} + k_{dx} \sum_{i=1}^3 i D_i^* t^{i-1} - k_{px} \sum_{i=0}^3 D_i^* t^i.$$

Теперь можно определить отклонение по координате OX_0 реального положения центра масс конвертоплана относительно заданного:

$$x^*(t) - x(t) = \Delta x, \quad (20)$$

или с учетом (18) из уравнения (19) определим:

$$\Delta x = \sum_{i=0}^3 D_i^* t^i - e^{-n_x t} (A_{11} e^{\sqrt{K_x} t} + A_{12} e^{-\sqrt{K_x} t}) + \sum_{i=0}^3 E_i^* t^i. \quad (21)$$

Очевидно, что величина ошибки зависит от коэффициентов k_{px} , k_{dx} и времени t .

Далее, аналогично, в соответствии с (12), (13), определим отклонение по координате OZ_0 реального положения центра масс конвертоплана относительно заданного:

$$\dot{z}^*(t) - \dot{z}(t) = \frac{1}{M} ((\sum_1^4 F_{iz}^* - Mg) + P(\dot{x}) - (\sum_1^4 F_{iz} - Mg) + P(\dot{x})) \quad (22)$$

$$\Delta \sum_1^4 F_{iz} = k_{dz} \Delta \dot{z} - k_{pz} \Delta z \quad (23)$$

$$\dot{z}^*(t) - \dot{z}(t) = \frac{1}{M} [(k_{dz} \Delta \dot{z} - k_{pz} \Delta z) + P(\Delta \dot{x})], \quad (24)$$

$$\ddot{z} + K_{dz} \dot{z} - K_{pz} z =$$

$$\ddot{z} + K_{dz} \dot{z} - K_{pz} z^* + \frac{1}{M} P(\Delta \dot{x}),$$

(25)

$$\text{где } \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^3 i D_i^* t^{i-1}, \quad K_{pz} = \frac{k_{pz}}{M},$$

$$K_{dz} = \frac{k_{dz}}{M},$$

$$\dot{x} = e^{-n_x t} [A_{11} e^{\sqrt{K_{px}} t} (-n_x + \sqrt{K_{px}}) + A_{12} e^{-\sqrt{K_{px}} t} (-n_x - \sqrt{K_{px}})] + \sum_{i=1}^3 i E_i^* t^{i-1}.$$

Решение уравнения (25) представим в виде общего и частного решений:

$$z = e^{-n_z t} (A_1 e^{\sqrt{K_{pz}} t} + A_2 e^{-\sqrt{K_{pz}} t}) + \sum_{i=0}^3 B_i^* t^i + z', \quad (26)$$

где $n_z = \frac{k_{dz}}{2M}$, частное решение z' зависит от вида $P(\dot{x})$.

Для малых скоростей и заданного движения:

$$P(\dot{x}^*) = \mu_x \sum_{i=1}^3 i D_i^* t^{i-1}, \quad (27)$$

для возмущенного движения:

$$P(\dot{x}) = \mu_x e^{-n_x t} [A_{11} e^{\sqrt{K_{px}} t} (-n_x + \sqrt{K_{px}}) + A_{12} e^{-\sqrt{K_{px}} t} (-n_x - \sqrt{K_{px}})] + \sum_{i=1}^3 i E_i^* t^{i-1}. \quad (28)$$

Отклонение реального положения центра масс от заданного определим как:

$$\Delta z = H - z = H - e^{-n_z t} (A_1 e^{\sqrt{K_{pz}} t} - A_2 e^{-\sqrt{K_{pz}} t}) - \sum_{i=0}^3 B_i^* t^i - z'. \quad (29)$$

Результаты и их обсуждение

Проведем моделирование переходного процесса и построим графики зависимостей корректирующих воздействий ΔX , ΔY от коэффициентов пропорционального k_p и дифференциального k_d регуляторов [14, 15, 20]:

$$\Delta x = \Delta x(k_{dx}(t), k_{px}(t)),$$

$$\Delta z = \Delta z(k_{dz}(t), k_{pz}(t)). \quad (30)$$

Необходимо также определить значения $K^{\min}$, $K^{\max}$ соответствующие минимальному отклонению реального положения центра масс конвертоплана от заданного из условий:

$$\frac{d\Delta x}{dK_{px}} = 0, \quad \frac{d\Delta x}{dK_{dx}} = 0, \quad \frac{d\Delta z}{dK_{pz}} = 0, \\ \frac{d\Delta z}{dK_{dz}} = 0. \quad (31)$$

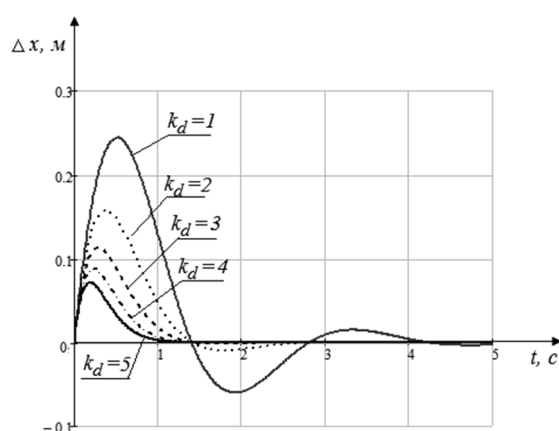


Рис.3. График отклонения реального положения центра масс от заданного при начальной скорости $v_0=1$ м/с; $k_{px}=-5$ и различных k_{dx}

Fig.3. Diagram of the deviation of the actual position of the center of mass from the set position at the initial velocity $v_0 = 1$ m/s; $k_{px}=-5$ and various k_{dx}

На рис. 5 приведен график линий равного уровня для минимальных и максимальных значений интегральной ошибки $\bar{\Delta x} = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta x(t))^2 dt$ для коэффициентов k_{px} и k_{dx} регулятора.

На рис. 6 представлены графики зависимости отклонения по оси OZ_0 для различных значений коэффициентов μ_x , определяющих подъёмную силу крыла. Из анализа графиков следует, что с уве-

На рисунках 3, 4 приведены зависимости корректирующей ошибки Δx от различных значений коэффициентов k_{px} , k_{dx} регулятора.

Можно отметить, что при определенных коэффициентах пропорционально-дифференциального регулятора при внешнем возмущении колебания системы в переходный период быстро затухают и аппарат восстанавливает равновесное состояние как по оси OX_0 так и по оси OZ_0 .

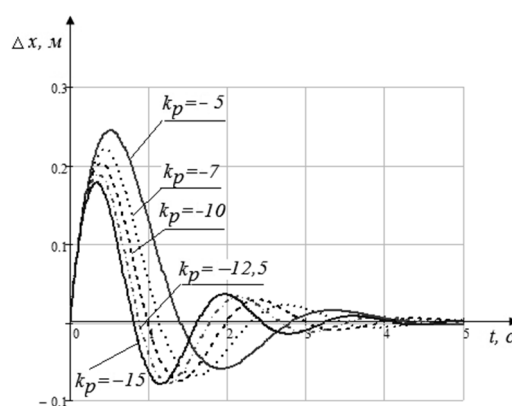


Рис. 4. График отклонения реального положения центра масс от заданного при начальной скорости $v_0=1$ м/с; $k_{dx}=1$ и различных k_{px}

Fig.4. Diagram of the deviation of the actual position of the center of mass from the given position at the initial velocity $v_0=1$ m/s; $k_{dx}=1$ and various k_{px}

личением μ_x , ошибка, вызванная возмущением, существенно возрастает при сохранении устойчивого состояния и быстродействия.

На рис. 7-8 приведены зависимости отклонения реальной позиции конвертоплана от заданной по координате OZ_0 при изменении значений коэффициента дифференциальной и пропорциональной составляющих регулятора САУ соответственно.

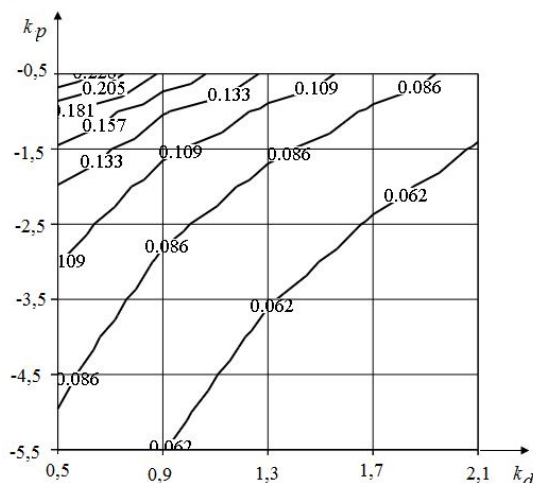


Рис. 5. График линий разного уровня для значений k_{px} и k_{dx} регулятора
Fig.5. Diagram of the lines of different level for values for k_{px} and k_{dx} of the control

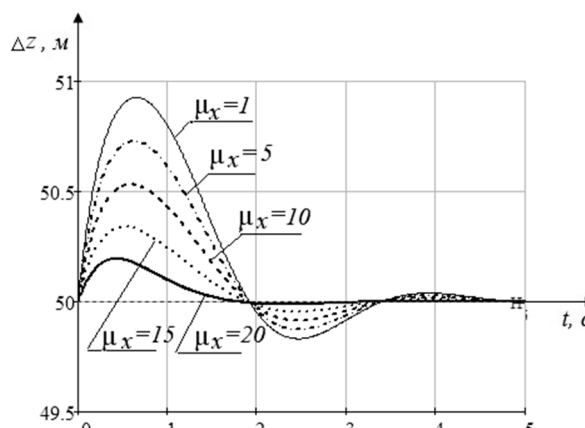


Рис.6. График отклонения реального положения центра масс по координате OZ_0 от заданного (при $v_{0z}=1$ м/с; $v_{0y}=1$ м/с; $H=50$ м; $n_y=2$ с⁻² и различных коэффициентах μ_x)

Fig.6. Diagram of the deviation of the actual position of the center of mass from the given position in OZ_0 coordinate (if $v_{0z}=1$ m/s; $v_{0y}=1$ m/s; $H=50$ m; $n_y=2$ s⁻² and various ratios μ_x)

Характер изменения графиков свидетельствует о существенном влиянии коэффициентов регулятора на характер переходного процесса в части амплитудных значений ошибки и времени пе-

реходного процесса. Для минимизации ошибки позиционирования необходимо решать задачу синтеза параметров регулятора, так же, как это выполнено для координаты OX_0 (рис 6).

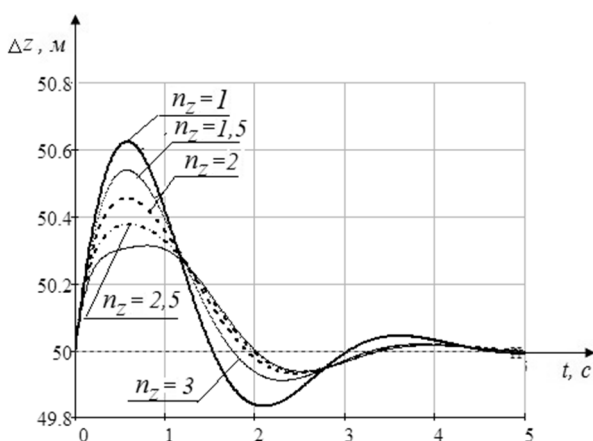


Рис.7. График отклонения реального положения центра масс по координате OZ_0 от заданного (при $v_{0y}=1$ м/с; $H=50$ м; $K_{pz}=-4$ с⁻² и различных коэффициентах n_z)

Fig.7. Diagram of the deviation of the actual position of the center of mass from the given position in OZ_0 coordinate (if $v_{0y}=1$ m/s; $H=50$ m; $K_{pz}=-4$ s⁻² and various ratios n_z)

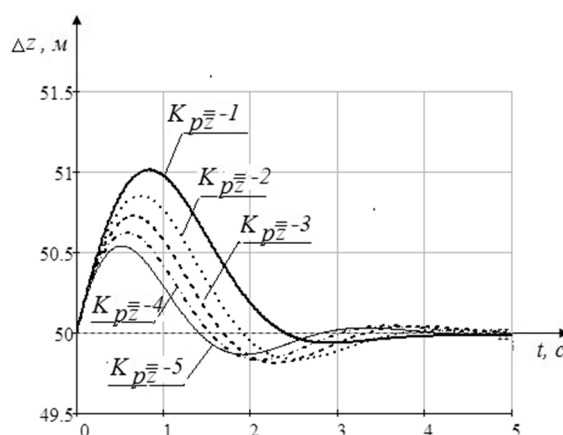


Рис.8. График отклонения реального положения центра масс по координате OZ_0 от заданного. ($v_{0y}=1$ м/с; $H=50$ м; $n_z=2$ с⁻² и различных коэффициентах K_{pz})

Fig.8. Diagram of the deviation of the actual position of the center of mass from the given position in OZ_0 coordinate (if $v_{0y}=1$ m/s; $H=50$ m; $n_z=2$ s⁻² and various ratios K_{pz})

Выводы

В результате проведенных исследований разработана математическая модель пространственного движения конвертоплана-квадрокоптера с одновременным отклонением вектора тяги вращающихся винтов, предложена структурная модель устройства, состоящая из четырех вращающихся винтов и крыла, обеспечивающая высокие аэродинамические характеристики.

Особое внимание уделено изучению закономерностей автоматического движения аппарата в переходных режимах в момент, когда происходит переход из вертикального полета в горизонтальный. Определены отклонения реальной траектории от заданной как по вертикальной, так и по горизонтальной траекториям. Рассмотрен случай применения ПД регулятора.

Определены параметры минимизации средней квадратической ошибки.

Список литературы

1. Salazar-Cruz S., Kendoul F., Lozano R., Fantoni, I. Real-time stabilization of a small three-rotor aircraft // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. 2008. 44(2).
2. Atsushi Oosedo, Satok o Abiko, Shota Narasaki, Atsushi Kuno, Atsushi Konno, Masaru Uchiyama. Flight control systems of a quad tilt rotor unmanned aerial vehicle for a large attitude change // Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on. 2015. P. 2326-2331.
3. Cai G. et al. First-principles modeling of a miniature tilt-rotor convertiplane in low-speed operation // Proc. Int. Micro Air Veh. Conf. Competition. 2016. С. 161-166.
4. Поляков Р. Ю. Разработка летательных робототехнических средств для мониторинга окружающей среды на основе бионических идей // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: материалы XIII науч.-практ. конф. М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2014. С. 101-102.
5. Емельянова О. В. [и др.] Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. С. 38.
6. Патент на полезную модель № 157967, МПК В64С 25/62. Двигатель воздушный с изменяемым вектором тяги / Яцун С.Ф., Ефимов С.В., Мищенко В.Я., Яцун А.С., Емельянова О.В., Мартинез А. (РФ). № 2015131037/11 от 27.07.2015.
7. Патент на полезную модель №164555, МПК В64С 27/08. Летательный аппарат, выполненный по схеме трикоптера / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Емельянова О.В., Савин А.И. (РФ). № 2015148004/11 от 09.11.2015.

8. Патент на полезную модель №166334, МПК В64С 27/08. Мультироторный аппарат с изменяемым вектором тяги / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Емельянова О.В., Савин А.И. (РФ). № 2016107088/11 от 29.02.2016.

9. Патент на полезную модель №166334, МПК В64С 33/02. Орнитоптер / С.Ф. Яцун, В.Я. Мищенко, А. Мартинез, О.В. Емельянова (РФ). №2019102951 от 04.02.2019.

10. Сантьяго М. Л. А., Емельянова О. В., Яцун С. Ф. Исследование колебаний конвертоплана-квадрокоптера при переходном режиме в вертикальной продольной плоскости // Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт. 2019. С. 23-31.

11. Мартинез Леон А.С. Разработка конструкции конвертоплана // Сборник научных трудов 2-й Международной научно-практической конференции: в 2 т. Курск, 2015. Т. 2. С. 265-268.

12. Математическое моделирование робота с переменным вектором тяги / В. Е. Павловский, С. Ф. Яцун, О. В. Емельянова, С. П. Стуканёва // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015): труды второго всероссийского научно-практического семинара. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С.99-106.

13. Яцун С. Ф., Емельянова О.В., Савин А.И. Моделирование движения квадрокоптера при отклонении осей несущих винтов относительно корпуса // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2ч. / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. Ч.1. С.329 - 338.

14. Jatsun S. et al. Control fligth of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2017. С. 1-5.

15. Yatsun A., Lushnikov B., Emelyanova O. Motion Control Automation in the Quadcopter Convertiplane in a Transient Mode // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2018. С. 1-6.

16. Jatsyn S. F. et al. Mathematical model of the quadrotor type unmanned aerial vehicle with neurocontrollerl //Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits: proc. of the 18th Int. Conf. on Circuits. 2014. С. 46-50.

17. Павловский М. А., Акинфиева Л. Ю., Бойчук О. Ф. Теоретическая механика: Динамика. Киев: Выща шк., 1990.

18. Синтез параметров электроприводов БПЛА типа конвертоплан–трикоптер/ О.В. Емельянова, Г.К. Казарян, А.С. Мартинез Леон, С.Ф. Яцун, С.П. Стуканева // IV Международная школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин» School-NDM 2017: сборник трудов. М.: ИМАШ РАН, 2017. С. 239-249.

19. Ефремов А. В., Захарченко В. Ф., Овчаренко В. Н. Динамика полета / под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Машиностроение, 2011. 776 с.

20. Emelyanova O.V., Kazaryan G.K., Martinez Leon A.S., Jatsun S.F. The synthesis of electric drives characteristics of the UAV of “convertiplane – tricopter” type/MATEC Web Conf. Volume 99, 2017 2016 Workshop on Contemporary Materials and Technologies in the Aviation Industry (CMTAI2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20179902002>.

References

1. Salazar-Cruz S., Kendoul F., Lozano R., Fantoni I. Real-time stabilization of a small three-rotor aircraft. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 2008, 44(2).

2. Atsushi Oosedo, Satok o Abiko, Shota Narasaki, Atsushi Kuno, Atsushi Konno, Masaru Uchiyama. Flight control systems of a quad tilt rotor unmanned aerial vehicle for a large attitude change. Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on, pp. 2326–2331.

3. Cai G. et al. First-principles modeling of a miniature tilt-rotor convertiplane in low-speed operation. Proc. Int. Micro Air Veh. Conf. Competition, 2016, pp. 161–166.

4. Polyakov R. U. [Development of robotic aircraft for environmental monitoring based on bionic ideas]. *Materialy XIII nauch.-prakt. konf. "Problemy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsii"* = [Proceedings of XIII scientific.-prakt. Conf. "Problems of emergency forecasting"]. Moscow, 2014, pp. 101–102 (In Russ.).

5. Emelyanova O. V. et al. Mobil'nyi letatel'nyi kompleks dlya rannego obnaruzheniya ochagov vozgoraniya [Mobile aircraft complex for early detection of fires]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2018, pp. 38 (In Russ.).

6. Yatsun S.F., Efimov S.V., Mishchenko V.Y., Jatsun A.S., Emelyanova O.V., Martinez A. Dvizhitel' vozdushnyi s izmenyaemym vektorom tyagi [The propulsion unit air with a changeable thrust vector]. Patent RF, no. 2015131037/11, 27.07.2015. (In Russ.).

7. Yatsun S.F., Mishchenko V.Y., Emelyanova O.V., Savin A.I. Letatel'nyi apparat, vy-polnennyi po skheme trikoptera [The aircraft executed according to the scheme of a triko-pter]. Patent RF, no. 2015148004/11, 09.11.2015. (In Russ.).

8. Yatsun S.F., Mishchenko V.Y., Emelyanova O.V., Savin A.I. Mul'tirotornyi apparat s izmenyaemym vektorom tyagi [The multirotor device with a changeable vector of draft]. Patent RF, no. 2016107088/11, 29.02.2016. (In Russ.).

9. Yatsun S.F., Mishchenko V.Y., Martinez A., Emelyanova O.V. Ornitopter [Ornithopter]. Patent PF, no. 2019102951, 04.02.2019. (In Russ.).

10. Santiago M. L. A., Emelyanova O. V., Jatsun S. F. Issledovanie kolebanii konvertoplana-kvadroptera pri perekhodnom rezhime v vertikal'noi prodol'noi ploskosti [Study of oscillations of the tiltrotor-quadrocopter in the vertical longitudinal plane in the transition mode]. *Nauka i obrazovanie: otechestvennyi i zarubezhnyi opyt = Science and education: domestic and foreign experience*, 2019, pp. 23–31 (In Russ.).

11. Martinez Leon A. S. [Development of the tiltrotor design]. *Sbornik nauchnykh trudov 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection of scientific papers of the 2nd International scientific and practical conference], Kursk, 2015, vol. 2, pp. 265–268 (In Russ.).

12. Pavlovsky V. E., Jatsun S. F., Emelyanova O. V., Stukaneva S. P. [Mathematical modeling of a robot with a variable thrust vector]. *Trudy Vtoroi vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminara "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta" (BTS-II-2015)" [Proceedings of the Second all-Russian scientific and practical seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence" (BTS-2015)"]*. St. Petersburg, 2015, pp. 99–106 (In Russ.).

13. Jatsun S. F., Emelyanova O. V., Savin A. I. [Simulation of the movement of the quadcopter when the axis of the rotor are deflected relative to the body]. *Sb. nauch. st. "Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny"*. [Collection of scientific works "Vibration technology, mechatronics and managed machines"]. Kursk, 2014, part 1. pp. 329 – 338 (In Russ.).

14. Jatsun S. et al. Control flight of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2017. IEEE, 2017, pp. 1–5.

15. Yatsun A., Lushnikov B., Emelyanova O. Motion Control Automation in the Quadcopter Convertiplane in a Transient Mode. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.

16. Jatsun S. F. et al. Mathematical model of the quadrotor type unmanned aerial vehicle with neurocontroller. *Advances in Robotics, Mechatronics and Circuits: proc. of the 18th Int. Conf. on Circuits*, 2014, pp. 46–50.

17. Pavlovsky M.A., Akinfeeva L.Y., Boichuk O.F. *Teoreticheskaya mekhanika: Dinamika* [Theoretical mechanics. Dynamics]. Kiev, *Vischa shkola Publ.*, 1990 (In Russ.).

18. Emelyanova O. V., Kazaryan G. K., Martinez Leon A.S., Jatsun S. F., Stukaneva S.P. [The Synthesis of Electric Drives Characteristics of the UAV of “Convertiplane–Tricopter”] *Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoi shkola-konferentsii molodykh uchenykh "Nelineinaya dinamika mashin" School-NDM 2017* [Type. IV international school-conference of young scientists "Nonlinear dynamics of machines" School-NDM 2017: Proceedings]. Moscow, IMASH RAN Publ., 2017, pp. 239–249 (In Russ.).

19. Efremov A. V., Zakharchenko V. F., Ovcharenko V. N. *Dinamika poleta: uchebnik dlya studentov vysshih uchebnykh zavedenii* [Flight dynamics: a textbook for students of higher educational institutions]; ed. by Byushgen G. S. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011, 776 p. (In Russ.).

20. Emelyanova O. V., Kazaryan G. K., Leon A. M., Jatsun S. F. (2017). The Synthesis of Electric Drives Characteristics of the UAV of “Convertiplane–Tricopter” Type. In *MATEC Web of Conferences*, vol. 99, p. 02002. EDP Sciences.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergei F. Yatsun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Лушников Борис Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bvl_61@inbox.ru

Boris V. Lushnikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bvl_61@inbox.ru

Емельянова Оксана Викторовна кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru

Oksana V. Emelyanova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Mechanics, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru

Стуканева Светлана Павловна, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: stuksvetlana@yandex.ru

Svetlana P. Stukaneva, Undergraduate, Mechanics, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: stuksvetlana@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-57-71>

Исследование влияния гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков на физико- механические свойства аддитивных изделий

Е. В. Агеев ¹ ✉, А. Ю. Алтухов ¹, А. Н. Новиков ²

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

² ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ул. Комсомольская, д. 95, Россия, г. Орел, 302026, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью работы являлось исследование влияния гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков на физико-механические свойства аддитивных изделий.

Методы. Для выполнения намеченных исследований были выбраны отходы кобальтохромового сплава марки КХМС «ЦЕЛЛИТ». В качестве рабочей жидкости – спирт бутиловый. Для получения кобальтохромовых порошковых материалов электроэрозионным диспергированием пользовались установкой для ЭЭД токопроводящих материалов. Диспергируемый материал засыпали в эксикатор, заполненный бутиловым спиртом, который используется в качестве рабочей жидкости для диспергирования. Бутиловый спирт C_4H_9OH – представитель одноатомных спиртов. Это бесцветная немного вязкая жидкость, не имеющая цвета и со свойственным сивушному маслу запахом. Смешивается с органическими растворителями. Бутанол используют в качестве растворителя в лакокрасочной промышленности, при изготовлении смол и пластификаторов, а также во многих других отраслях. Для получения экспериментальных образцов аддитивных изделий использовалась установка для послойного нанесения порошковых материалов плазмой. Гранулометрический состав полученных порошков авторы исследовали по методике диспергирования в жидкости с ультразвуком. Методика исследования (ФР 1.27.2009.06762 «Методика выполнения измерений размера частиц в суспензиях, эмульсиях и аэрозолях в нанометровом и коллоидном диапазонах с использованием эффекта динамического рассеяния света»).

Результаты. Экспериментально установлено, что условия получения и дисперсность порошков определяют их поведение при спекании. С увеличением дисперсности порошка процесс спекания ускоряется и протекает более активно, а механические свойства полученных изделий при этом повышаются. Интенсификации спекания порошка способствуют оксиды, содержащиеся в большом количестве в мелких порошках и восстанавливающиеся при их нагреве при спекании. Губчатая металлическая поверхность, образующаяся после исчезновения оксида, оказывается более активной, чем поверхность изначально свободная от оксидной пленки. С увеличением дисперсности и удельной поверхности порошка его проплавление увеличивается, пористость уменьшается, а микротвердость при этом увеличивается. Наличие частиц порошка разных фракций увеличивает плотность его усадки за счет заполнения впадин и микропор на стыках крупных частиц, что в дальнейшем приводит к снижению шероховатости спеченных изделий и повышению предела прочности при сжатии и изгибе.

Заключение. Проведенные исследования позволят выявить связь между технологией получения электроэрозионных кобальтохромовых порошков и физико-механическими свойствами (пористость, микротвердость, предел прочности на сжатие и изгиб, шероховатость поверхностного слоя и др.) экспериментальных образцов, а также управлять процессом формирования структуры и свойств изделий, полученных по аддитивным технологиям.

Ключевые слова: кобальтохромовый сплав; отходы; электроэрозионное диспергирование; порошок; аддитивные изделия; физико-механические свойства.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда. Номер проекта 17-79-20336.

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

Для цитирования: Агеев Е. В., Алтухов А. Ю., Новиков А. Н. Исследование влияния гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков на физико-механические свойства аддитивных изделий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 57-71. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-57-71>.

Статья поступила в редакцию 30.05.2019

Статья подписана в печать 01.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-57-71>

Study of the Influence of the Granulometric Composition of Electrospark Cobalt-Chromium Powders on the Physical and Mechanical Properties of Additive Products

Evgniy V. Ageev ¹ ✉, Aleksandr Y. Altuhov ¹, Aleksandr N. Novikov ²

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

² Orel State University after Ivan Turgenev, 95, Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this work is to study the influence of the granulometric composition of electrospark cobalt-chromium powders on the physico-mechanical properties of additive products.

Methods. Wastes of cobalt-chromium alloy "CELLIT" was chosen for this research. Butyl alcohol was chosen as a working fluid. To obtain cobalt-chromium powder materials by electrospark dispersion, a unit for ESD of conductive materials was used. The dispersed material was charged into a desiccator filled with butyl alcohol used as a working fluid for dispersion. Butyl alcohol C_4H_9OH belongs to monatomic alcohols. It is a colorless slightly viscous liquid with a peculiar smell of fusel oil, miscible with organic solvents. Butanol is used as a solvent in the paints and coatings industry, in the manufacture of resins and plasticizers, and in many other industries. To obtain experimental samples of additive products, the unit for lamination of powder materials by plasma was used. The authors studied the granulometric composition of the obtained powders by the method of ultrasonic dispersion in a liquid. The research methodology is FR 1.27.2009.06762 "Technique of particle size measurements in suspensions, emulsions and aerosols in nanometer and colloidal ranges with the use of dynamic light scattering effect".

Results. Experiments proved that the conditions of production and dispersion of powders determine their behavior during sintering. With the increase of the dispersion of the powder, sintering process accelerates and proceeds more

actively, and the mechanical properties of the resulting products improve. Intensification of powder sintering is facilitated by oxides contained in large quantities in fine powders and reduced when heated during their sintering. The sponge metal surface, formed after the disappearance of the oxide, is more active than the surface, which is initially free from the oxide film. With the increase of dispersion and specific surface area of the powder, its penetration increases, the porosity decreases, and the microhardness increases. The presence of powder particles of different fractions increases the density of its shrinkage by filling cavities and micropores at the joints of large particles, which further leads to the decrease of the roughness of sintered products and the increase of the ultimate compressive and bending strength.

Conclusion. The conducted research reveals the relationship between the technology of electrospark cobalt-chromium powders production and physico-mechanical properties (porosity, microhardness, ultimate compressive strength, ultimate bending strength, roughness of the surface layer, etc.) of the experimental samples, and also allows controlling the process of the formation of structure and properties of products obtained by additive technologies.

Keywords: cobalt-chromium alloy; wastes, electrospark dispersing; powder; additive products; physical and mechanical properties.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian science Foundation. Project number 17-79-20336.

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

For citation: Ageev E. V., Altuhov A. Y., Novikov A. N. Study of the Influence of the Granulometric Composition of Electrospark Cobalt-Chromium Powders on the Physical and Mechanical Properties of Additive Products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 57-71 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-57-71>.

Received 30.05.2019

Accepted 01.07.2019

Введение

Трехмерная или объемная печать получила распространение в прошлом веке. Первую коммерческую стереолитографическую машину — SLA — Stereolithography Apparatus разработала компания 3D Systems. Проектирование (CAD), моделирование и расчеты (CAE) и механообработка (CAM) стимулировали бурные темпы развития технологий трехмерной печати [1-14].

Для машин, используемых для трехмерной печати, наиболее важной характеристикой материала является его форма, которая влияет на текучесть и укладку [9-15].

В настоящее время особый интерес вызывает технология получения частиц сферической формы с заданным распределением по фракциям. Это технология электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) [16-20].

Применению данной технологии в машинах для трехмерной печати препятствует отсутствие технологических характеристик применяемого порошкового материала, таких, как гранулометрический состав. Поэтому требуется проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния фракционного состава порошков на свойства аддитивных изделий [21-23].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния фракционного состава электроэрозионных кобальто-хромовых порошков на физико-механические свойства аддитивных изделий.

Материалы и методы

Для диспергирования выбран сплав марки КХМС «ЦЕЛЛИТ», рабочая жидкость – спирт бутиловый. Для диспергирования металлоотходов использовали установку для ЭЭД электропроводных материалов. Диспергируемый материал засыпали в эксикатор [24, 25], заполненный бутиловым спиртом, который используется в качестве рабочей жидкости для диспергирования [24, 25], для получения пластификаторов, а также во многих других отраслях.

Для получения экспериментальных образцов аддитивных изделий использовалась установка для послойного нанесения порошковых материалов плазмой. Процесс нанесения представлен на рис. 1.

Гранулометрический состав полученных порошков исследовали по методике диспергирования в жидкости с ультразвуком. Методика исследования (ФР 1.27.2009.06762 «Методика выполнения измерений размера частиц в суспензиях, эмульсиях и аэрозолях в нанометровом и коллоидном диапазонах с использованием эффекта динамического рассеяния света»). Пробоподготовка: диспергирование пробы в жидкости. Измерение фона – для того, чтобы сни-

зить влияние измерительной жидкости перед каждым измерением проводят фоновое измерение.



Рис. 1. Процесс послойного нанесения порошков

Fig. 1. Powder layer-by-layer application process

Любое загрязнение от предыдущих измерений измеряется и устраняется его влияние на текущий результат. Измерение распределения частиц по размеру: образец исследуемого объемом около 1-5 г помещали в модуль для диспергирования в жидкости (объемом 500 мл). Измерение начиналось автоматически, как только значение абсорбции достигало указанной величины. Параметры измерения: Тип измерения – по методу Фраунгофера; диапазон измерения – 0,1 [мкм] – 1021,87 [мкм]; разрешение – 102 канала (20/383 мм); продолжительность измерения – 100 (сканов); регуляризация – средняя модель [21].

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования гранулометрического состава кобальтохромовых порошков представлены на рис. 2.

Ранее проведенные исследования кобальтохромовых порошковых материалов (растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, рентгеноструктурный анализ) показали отсутствие существенных различий в свойствах полученных материалов, кроме гранулометрического состава.

Поэтому экспериментальные образцы аддитивных изделий в количестве 4 штук были получены из электроэрозионных порошков на основе сплавов Co-Cr различного гранулометрического состава.

Образец №1 был получен из частиц порошка со средним размером 24,97 мкм, арифметическое значение – 24,97 мкм.

Образец №2 был получен из частиц порошка со средним размером 26,58 мкм, арифметическое значение – 26,576 мкм.

Образец №3 был получен из частиц порошка со средним размером 27,93 мкм, арифметическое значение – 27,927 мкм.

Образец №4 был получен из частиц порошка со средним размером 30,68 мкм, арифметическое значение – 30,682 мкм.

Результаты исследования гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков на физико-механические свойства аддитивных изделий представлены на рисунке 3.

Экспериментально установлено, что условия получения и дисперсность порошков определяют их поведение при спекании.

С увеличением дисперсности порошка процесс спекания ускоряется и протекает более активно, а механические свойства полученных изделий при этом повышаются.

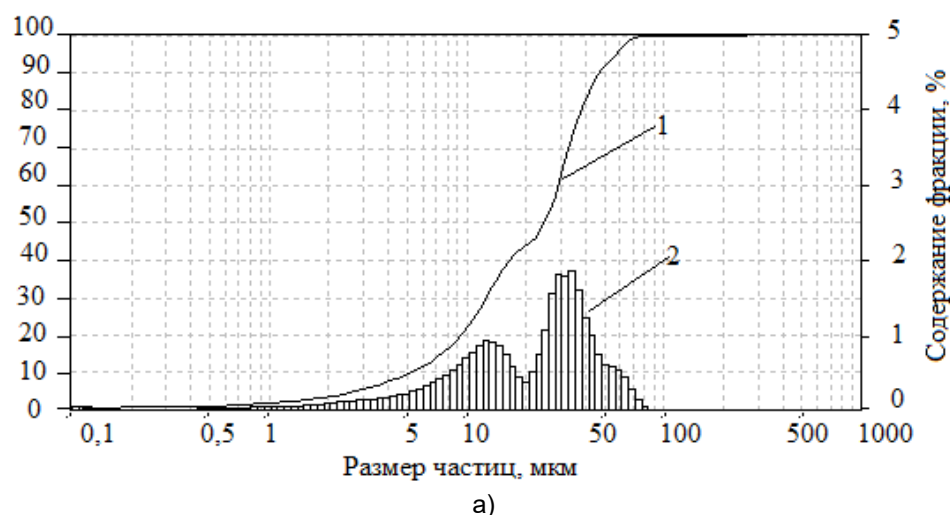


Рис. 2. Распределение по размерам микрочастиц образцов: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4 (1 – интегральная кривая, 2 – гистограмма) (окончание см. с. 62)

Fig. 2. Size distribution of samples microparticles: a – 1; b – 2; c – 3; d – 4 (1 – cumulative curve, 2 – bar graph) (ends see p.62)

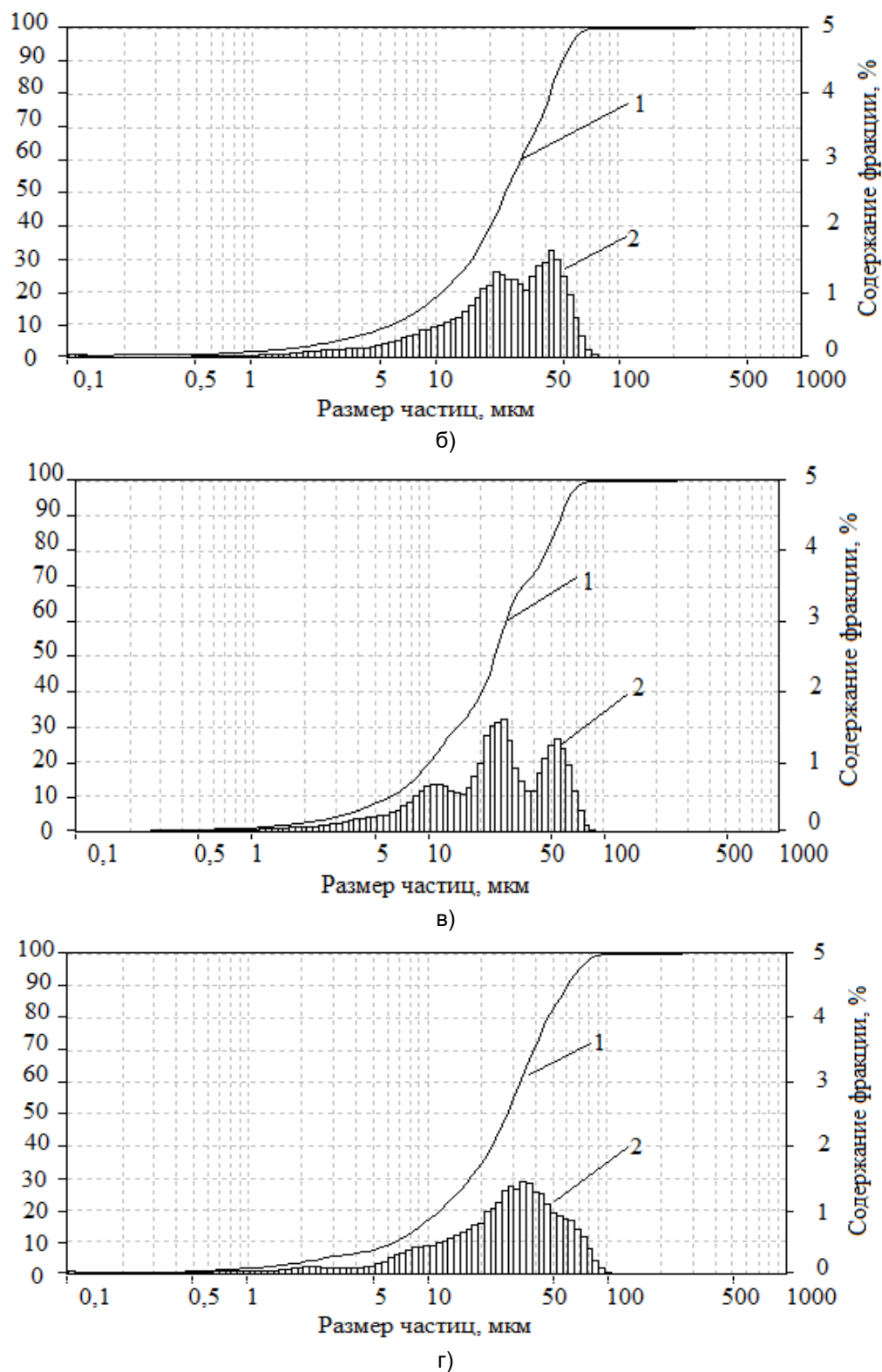


Рис. 2. Распределение по размерам микрочастиц образцов: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4
(1 – интегральная кривая, 2 – гистограмма) (начало см. с. 61)

Fig. 2. Size distribution of samples microparticles: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4 (1 – cumulative curve, 2 – bar graph)
(beginning see p.61)

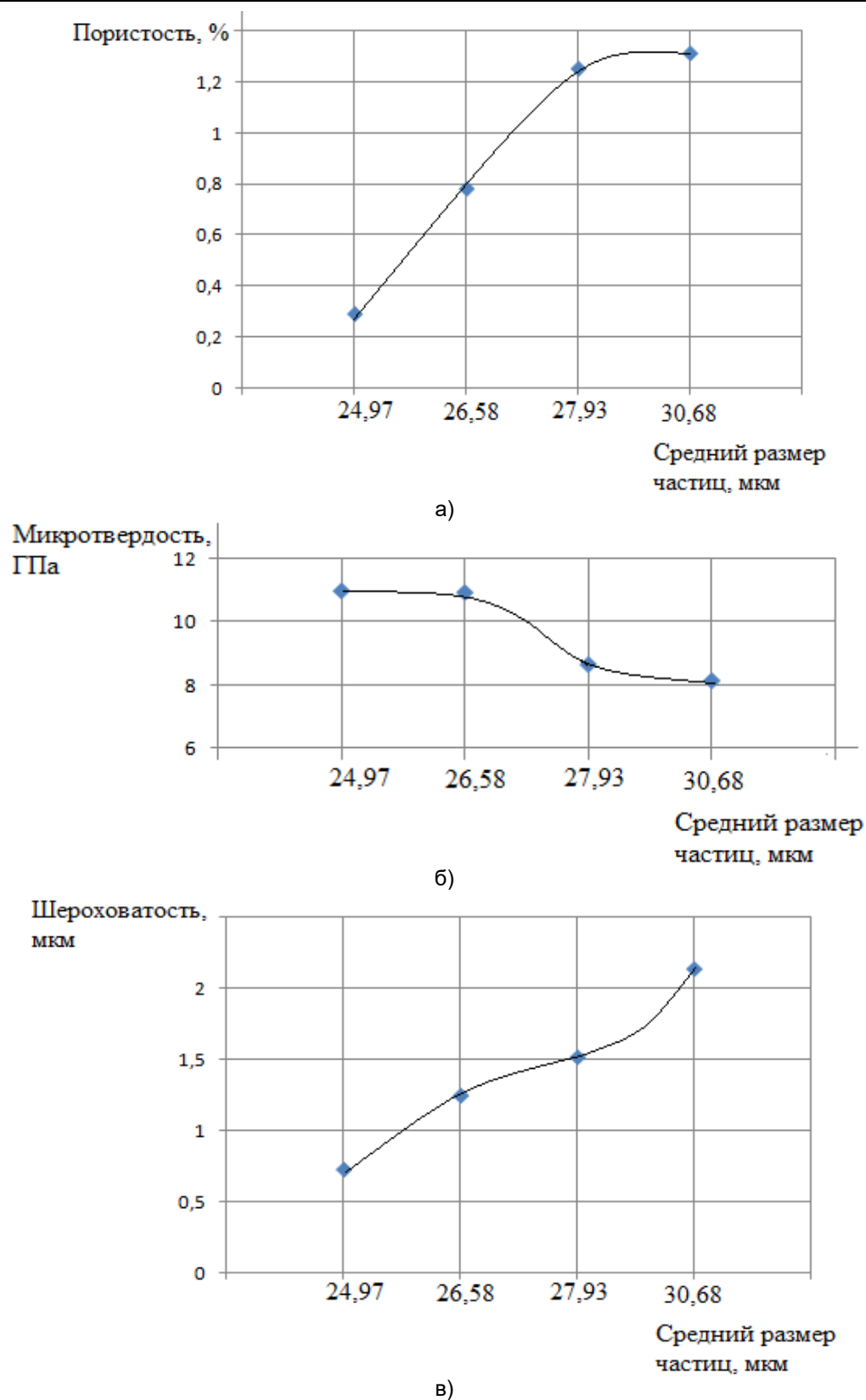
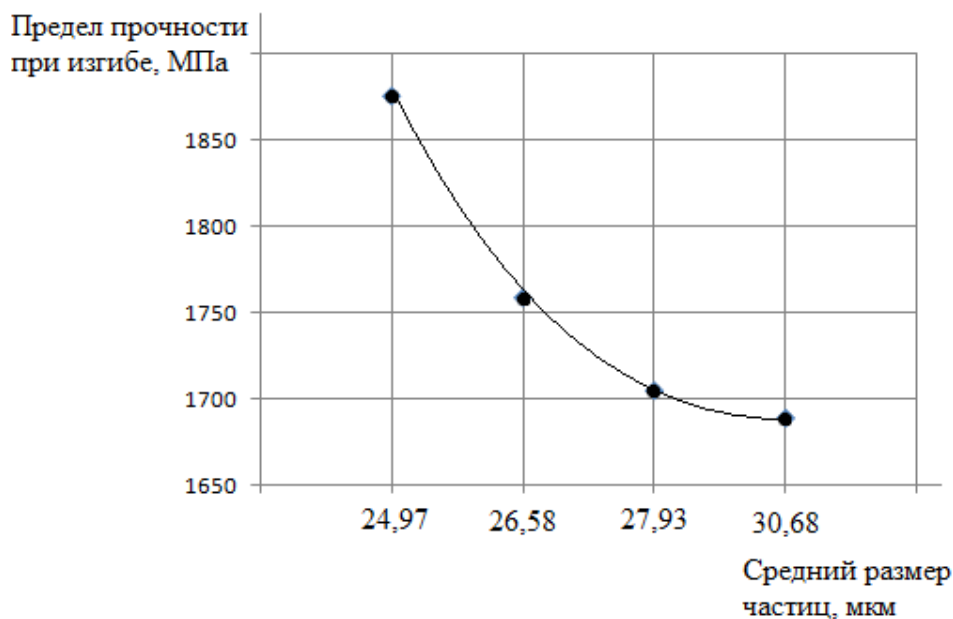
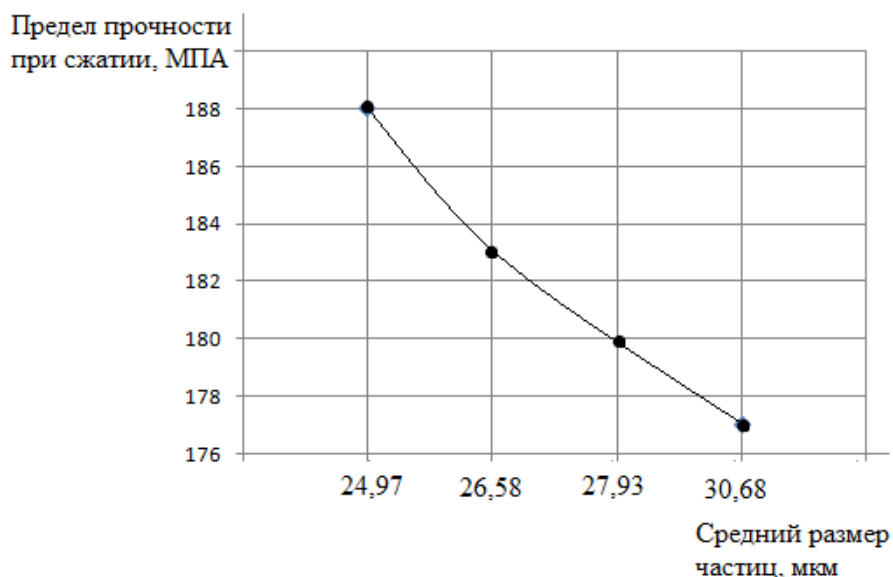


Рис. 3. Зависимости исследуемых параметров от среднего размера частиц: а – пористости; б – микротвердости; в – шероховатости; г – предела прочности при изгибе; д – предела прочности при сжатии (окончание см. с. 64)

Fig. 3. Dependences of the studied parameters on the average particle size: а – porosity; б – microhardness; в – roughness; г – bending strength; д – compressive strength (ends see p.64)



г)



д)

Рис. 3. Зависимости исследуемых параметров от среднего размера частиц: а – пористости; б – микротвердости; в – шероховатости; г – предела прочности при изгибе; д – предела прочности при сжатии (начало см. с. 65)

Fig. 3. Dependences of the studied parameters on the average particle size: а – porosity; б – microhardness; в – roughness; г – bending strength; д – compressive strength (beginning see p.65)

Интенсификации спекания порошка способствуют оксиды, содержащиеся в большом количестве в мелких порошках и восстанавливающиеся при их нагреве при спекании. Губчатая метал-

лическая поверхность, образующаяся после исчезновения оксида, оказывается более активной, чем поверхность, изначально свободная от оксидной пленки.

Как показали проведенные исследования, структурно-фазовое состояние образцов не претерпевает изменений и во всех четырех образцах остается постоянным наличие следующих фаз: Co, Cr, Ni и Cr_3Ni_2 .

С увеличением дисперсности и удельной поверхности порошка его проплавление увеличивается, и пористость уменьшается, а микротвердость при этом увеличивается. Наличие частиц порошка разных фракций увеличивает плотность его усадки за счет заполнения впадин и микропор на стыках крупных частиц, что в дальнейшем приводит к снижению шероховатости

спеченных изделий и повышению предела прочности при сжатии и изгибе.

Выводы

Проведенные исследования позволяют выявить связь между технологией получения электроэрозионных кобальтохромовых порошков и физико-механическими свойствами (пористость, микротвердость, предел прочности на сжатие и изгиб, шероховатость поверхностного слоя и др.) экспериментальных образцов, а также управлять процессом формирования структуры и свойств изделий, полученных по аддитивным технологиям.

Список литературы

1. Safdar A., Wei L.Y., Snis A. Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V // *Materials Characterization*. 2012. Vol. 65. P. 8–15.
2. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V / A. Safdar, H.Z. He, L.Y. Wei et al. // *Journal of Rapid Prototyping*, 2012. Vol. 18 (5). P. 401–408.
3. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213 (12). P. 2109–2118.
4. Loeber L., Biamino S., Ackelid U. et al. Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides // *Conference paper of 22nd International symposium “Solid freeform fabrication proceedings”*, University of Texas, Austin, 2011. P. 547-556.
5. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 776–781.
6. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // *International Materials Reviews*. 2012. Vol. 57 (3). P. 133-164.

7. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V // *Materials & Design*, 2012. Vol. 35. P. 120–125.

8. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and microstructure characterization of selective laser melted FeAl intermetallic parts // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 206. P. 4704–4709.

9. Wang Z., Guana K., Gaoa M. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 513. P. 518–523.

10. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2016. Т. 80. №. 4. С. 408.

11. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2013. № 2-2. С. 90-94.

12. Григорьянц А.Г., Третьяков Р.С., Фунтиков В.А. Повышение качества поверхностных слоев деталей, полученных лазерной аддитивной технологией // *Технология машиностроения*. 2015. № 10. С. 68-73.

13. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // *Труды МАИ*. 2014. № 78. С. 31.

14. Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров И.Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2011. № 7. С. 38-46.

15. Моделирование процесса спекания изделий из низкотемпературной керамики, формируемых аддитивными технологиями / В.Н. Лейцин, С.В. Пономарев, М.А. Дмитриева, И.В. Ивонин, И.М. Тырышкин // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 4. С. 21-27.

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

17. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов – перспективный материал для восстановления деталей автотракторной

техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

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

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

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

21. Свойства электроэрозионных порошков, используемых в производстве твердосплавных заготовок / О.В. Кругляков, А.С. Угримов, А.С. Осьминина, Е.В. Агеев // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1 (1). С. 119-121.

22. Хардилов С.В., Агеев Е.В., Зубарев М.А. О возможности переработки отходов шарикоподшипниковой стали методом электроэрозионного диспергирования // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1 (1). С. 211-214.

23. Новиков Е.П., Агеев Е.В., Сытченко А.Д. К вопросу о переработке алюминиевых отходов электроэрозионным диспергированием // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1 (1). С. 169-172.

24. Агеева Е.В., Агеев Е.В., Карпенко В.Ю. Размерный анализ частиц порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов электроэрозионным диспергированием в воде // Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 45-46.

25. Размерный анализ частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутиловом спирте / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, С.С. Гулидин, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 2 (19). С. 45-51.

References

1. Safdar A., Wei L. Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti–6Al–4V. *Characterization Of Materials*, 2012, vol. 65, pp. 8-15.

2. Safdar A., He H. Z., Wei L. Y., et al. Influence of technological parameters and thickness settings on surface roughness of EBM produced by Ti-6Al-4V. *Journal of Rapid Prototyping*, 2012, vol. 18 (5), pp. 401-408.
3. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials obtained by electron beam melting (EBM) of two different ti-6Al-4V powder fractions. *Journal of materials processing technology*, 2013, vol. 213 (12), pp. 2109-2118.
4. Loeber L., Biamino S., Ackelid U. et al. Comparison of selective laser and electron beam melts of titanium Aluminides. Conference paper of the 22nd International Symposium "Solid freeform fabrication proceedings", University of Texas, Austin, 2011, pp. 547-556.
5. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: investigation of microstructure and mechanical properties. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 776-781.
6. GU D. D., Miners W., Wissenbach K. R. Poprawe laser additive manufacturing of metal parts: materials, processes and mechanisms. *International Material Reviews*, 2012, vol. 57 (3), pp. 133-164.
7. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Influence of technological parameters on the microstructure and mechanical properties of selective laser melt Ti6Al4V. *Materials&Design*, 2012, vol. 35, pp. 120-125.
8. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and characterization of the microstructure of selective laser-melted FeAl intermetallic parts. *Technology of surfaces and coatings*, 2012, vol. 206, pp. 4704-4709.
9. Z. Wang, Guana K., Gaoa M. Microstructure and mechanical properties of the deposited-IN718 by selective laser melting. *Journal of alloys and compounds*, 2012, vol. 513, pp. 518-523.
10. Kovalevo B. Modelirovanie protsessov v tekhnologiyakh lazernogo additivnogo izgotovleniya ob"emnykh metalloizdelii [Modeling of processes in technologies of additive laser manufacturing of bulk metal products]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series physical*, 2016, vol. 80, no. 4, p. 408 (In Russ.).
11. Smirnov In.V., Shaikhutdinova E. F. Vnedrenie additivnykh tekhnologii izgotovleniya detalei v seriinoe proizvodstvo [Introduction of additive manufacturing technologies of parts in mass production]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan state technical University. A. N. Tupolev*, 2013, no. 2-2, pp. 90-94 (In Russ.).

12. Grigor'yanc A.G., Tret'yakov R.S., Funtikov V.A. Povysheenie kachestva poverhnostnykh sloev detalej, poluchennykh lazernoj additivnoy tekhnologiej [Improving the quality of surface layers of parts obtained by laser additive technology]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of mechanical engineering*, 2015, no.10, pp. 68-73 (In Russ.).

13. CHumakov D.M. Perspektivy ispol'zovaniya additivnykh tekhnologij pri sozdanii aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy tekhniki [Prospects for the use of additive technologies in the creation of aviation and rocket and space technology]. *Trudy MAI = Trudy MAI*, 2014, no. 78, pp. 31 (In Russ.).

14. Grigor'yanc A.G., Novichenko D.YU., Smurov I.YU. Lazernaya additivnaya tekhnologiya izgotovleniya pokrytij i detalej iz kompozicionnogo materiala [Laser additive manufacturing technology of coatings and parts from composite material]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye = Proceedings of higher educational institutions. Engineering*, 2011, no. 7, pp. 38-46 (In Russ.).

15. Lejcin V.N., Ponomarev S.V., Dmitrieva M.A., Ivonin I.V., Tyryshkin I.M. Modelirovanie processa spekaniya izdelij iz nizkotemperaturnoj keramiki, formiruemykh additivnymi tekhnologiyami [Modeling of sintering process of products from low-temperature ceramics formed by additive technologies]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical mesomechanics*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 21-27 (In Russ.).

16. Ageeva E.V., Altuhov A.YU., Gulidin S.S., Ageev E.V., Gorohov A.A. Fazovyy sostav chastic poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem splava VK8 v butilovom spirte [Phase composition of powder particles obtained by electroerosive dispersion of VK8 alloy in butyl alcohol]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25 (In Russ.).

17. Ageev E.V., Gadalov V.N., Ageeva E.V., Bobryshev R.V. Poroshki, poluchennyye elektroerozionnym dispergirovaniem othodov tverdykh splavov - perspektivnyy material dlya vosstanovleniya detalej avtotraktornoj tekhniki [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste - a promising material for the restoration of parts of automotive equipment] *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

18. Ageeva E.V., Ageev E.V., Chaplygin V.YU., Gorohov A.A. Razmernyye harakteristiki bronzovogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v vode [Dimensional characteristics of bronze electroerosive powder obtained in water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

darstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology, 2016, no. 1 (18), pp. 30-35 (In Russ.).

19. Ageev E.V., Latypov R.A. Poluchenie i issledovanie zagotovok tverdogo splava iz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem vol'framsoderzhashchikh otkhodov [Obtaining and investigation of hard alloy billets from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Cvetnaya metallurgiya = Proceedings of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy*, 2014, no. 5, pp. 50-53 (In Russ.).

20. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2014, vol. 55, no. 6, pp. 577-580.

21. Kruglyakov, O. V. Ugrimov, A. S., Osminina A. S., Ageev E. V. Svoistva elektroerozionnykh poroshkov, ispol'zuemykh v proizvodstve tverdospлавnykh zagotovok [Properties electroerosion powders used in the production of carbide blanks]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technology*, 2015, no. 1 (1), pp. 119-121 (In Russ.).

22. Hardikov S. V., Ageev E. V., Zubarev M. A. O vozmozhnosti pererabotki otkhodov sharikopodshipnikovoi stali metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya [On the possibility of recycling ball bearing steel waste by electroerosive dispersion]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. = Modern materials, engineering and technologies*, 2015, no. 1 (1), pp. 211-214 (In Russ.).

23. Novikov E. P., Ageev E. V., Sytchenko A. D. K voprosu o pererabotke aluminievyykh otkhodov elektroerozionnym dispergirovaniem [On the issue of aluminum waste processing by electroerosive dispersion]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, engineering and technologies*, 2015, no. 1 (1), pp. 169-172 (In Russ.).

24. Ageeva E. V., Ageev E. V., Karpenko V. Yu. Razmernyi analiz chastits poroshka, poluchennogo iz vol'framsoderzhashchikh otkhodov elektroerozionnym dispergirovaniem v vode [Dimensional analysis of powder particles obtained from tungsten-containing waste by electroerosive dispersion in water]. *Vestnik mashinostroeniya = Vestnik mashinostroeniya*, 2015, no. 3, pp. 45-46 (In Russ.).

25. Ageev E. V., Altukhov, A. Yu., Gulidin S. S., Ageev E. V. Razmernyi analiz chastits poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem splava VK8 v butilovom spirte [Dimensional analysis of powder particles obtained by electroerosion dispersion of al-

loy VK8 in butyl alcohol]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2016, no. 2 (19), pp. 45-51 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Алтухов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alt997@yandex.ru

Aleksandr Y. Altuhov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Motor Transport and Motor Car Industry, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alt997@yandex.ru

Новиков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орел, Российская Федерация,
e-mail: novikovan@ostu.ru

Aleksandr N. Novikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Orel State University named after Ivan Turgenev, Orel, Russian Federacion
e-mail: novikovan@ostu.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-72-83>

Влияние расчетной длины элементов на критические параметры устойчивости рамно-стержневых конструктивных систем

Е.Г. Пахомова¹, К.О. Дубракова¹ ✉, С.В. Дубраков¹, И.В. Завалишин¹

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. В данной статье рассматривается влияние изменения расчетной длины элементов рамно-стержневых конструктивных систем, работающих в условиях стесненной бифуркации.

Методы. За критерий формы потери устойчивости элемента рамно-стержневой конструктивной системы принят знак работы концевых моментов и поперечных сил. С использованием указанного критерия получено выражение для оценки влияния изменения расчетной длины стоек рамы на критические параметры всей системы, позволяющее варьированием геометрии конструкции влиять на ее работоспособность. В качестве примера определены критические параметры устойчивости двухпролетной рамы, спроектированной из древесины деревянной, к среднему элементу которой прикладываем центральную силу $R_{кр}$, а к крайним – приложены силы с умножением на коэффициент α – $\alpha R_{кр}$. Выявлен вид бифуркации элементов рассматриваемой конструктивной системы (стесненной или принужденной) до и после изменения расчетной длины ее элементов. Вычисление неизвестных реакций и внутренних усилий системы выполнялось с применением специальных функций метода перемещений.

Результаты. Изменение расчетной длины элементов, теряющих устойчивость пассивно, не оказывает существенного влияния на критические параметры устойчивости рамно-стержневой конструктивной системы. При этом уменьшение на 30% расчетной длины стоек, находящихся в активной бифуркации, приводит к снижению критической силы на 50 %.

Заключение. Представлены достаточно простые алгебраические зависимости, позволяющие выявлять элементы рамно-стержневых систем, изменение расчетной длины которых оказывает существенное влияние на критические параметры устойчивости всей конструкции. При этом приведенные критерии позволяют оценивать ресурс сопротивления центрально сжатых элементов рамно-стержневых конструктивных систем.

Ключевые слова: устойчивость; рамно-стержневая система; активная бифуркация; пассивная бифуркация; расчетная длина.

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

Для цитирования: Влияние расчетной длины элементов на критические параметры устойчивости рамно-стержневых конструктивных систем / Е.Г. Пахомова, К.О. Дубракова, С.В. Дубраков, И.В. Завалишин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 72-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-72-83>.

Статья поступила в редакцию 31.05.2019

Статья подписана в печать 18.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-72-83>

Influence of Effective Length of Elements on the Critical Parameters of Frame-Rod Structural Systems' Stability

Yekaterina G. Pakhomova¹, Kseniya O. Dubrakova¹ ✉,
Sergey V. Dubrakov¹, Ilya V. Zavalishin¹

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

✉ e-mail: sirius080993@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. This article considers the influence of changes in the effective length of frame-rod structural systems elements operating under the conditions of constrained bifurcation.

Methods. A sign of the end moments and transverse forces has been taken as the criterion of the form of stability loss of a frame-rod structural system element. Using this criterion, an expression has been obtained to assess the effect of changes in effective length of the frame struts on the critical parameters of the entire system, which allows varying the geometry of the structure to affect its performance. As an example, the critical parameters of the stability of a two-span frame designed from wood have been defined, to the middle element of which we apply central force $P_{кр}$, and to the extreme elements we apply forces multiplied by the coefficient α - $\alpha P_{кр}$. The type of elements' bifurcation of the considered constructive system (constrained or forced) before and after the change of effective length of its elements has been revealed. The calculation of the unknown reactions and internal forces of the system were performed using special functions of the displacement method.

Results. Changes in effective length of elements that lose stability passively do not significantly affect the critical stability parameters of the frame-rod structural system. At the same time, a 30% reduction in effective length of struts being in active bifurcation leads to a 50% reduction in the critical force.

Conclusion. Quite simple algebraic dependences are presented in the paper that allow us to identify elements of frame-rod systems. Their change in effective length has a significant impact on the critical parameters of the entire structure' stability. At the same time, these criteria allow us to evaluate the resistance resource of centrally compressed elements of frame-rod structural systems.

Keywords: stability; frame-rod system; active bifurcation; passive bifurcation; effective length.

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 Y. G., Dubrakova K. O., Dubrakov S. V., Zavalishin I.V. Influence of Effective Length of Elements on the Critical Parameters of Frame-Rod Structural Systems' Stability. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 72-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-72-83>.

Received 31.05.2019

Accepted 18.07.2019

Введение

Основной сложностью при проектировании стержневых конструктивных систем, таких, как структура, ферма или рама, является обеспечение устойчивости ее элементов.

При этом в большинстве случаев процесс бифуркации начинается с небольшой группы или с одного элемента. Поэтому при решении задач устойчивости рамно-стержневых систем одним из важных этапов является определение элементов, способных при небольшом значении сжимающей силы вовлечь в общую бифуркацию всю конструкцию [1-8]. В связи с этим целью исследования является изучение особенностей деформирования элементов рамно-стержневых конструктивных систем при длительном нагружении с учетом их совместной работы и установление критерия бифуркации (стесненной или принужденной).

Материалы и методы

Рассмотрим один (центральный) стержень, выделенный из состава спроектируемой конструкции, который потеряет устойчивость при заданном значении нагрузки $R_{кр.}(t)$ (рис.1).

Энергию деформаций U_i , которая появляется при процессе бифуркации, высчитаем как сумму работ, сил и моментов на его концах:

$$U_i = A_i(N) + A_i(M_i, Q_i). \quad (1)$$

В случаях, когда указанная работа отрицательна $A_i(M_i, Q_i) < 0$, стержень теряет устойчивость активно, так как работа продольной силы N_i гасит повышение потенциальной энергии деформации соседних элементов (их опорных реакций) и стержня U_i .

В этом случае критерий $A_i(M_i, Q_i) > 0$ будет признаком пассивной потери устойчивости, то есть рядом стоящие стержни (крайние) провоцируют его бифуркации.

Выявленные значения перемещений, поперечных сил и моментов, вызванных новыми усилиями в элементах, для вычисления их работы, получается вычислить с применением стандартных функций метода перемещений [9-12].

Применяем систему стандартного вида метода перемещений, взяв за неизвестные углы поворота и смещение узлов Z_1, Z_2, Z_n . Вычисляем однородную систему уравнений для вычисления неизвестных реакций и раскрытия статической неопределимости:

$$\left. \begin{aligned} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_1 + \dots + r_{1n} \cdot Z_n &= 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_1 + \dots + r_{2n} \cdot Z_n &= 0 \\ &\dots \\ r_{n1} \cdot Z_1 + r_{n2} \cdot Z_1 + \dots + r_{nn} \cdot Z_n &= 0 \end{aligned} \right\}, (2)$$

$$v_i = l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}}}, \quad (i = 1, 2, 3 \dots n), \quad (3)$$

где B_{red} – жесткость поперечного сечения стержня, определяемая как произведение модуля деформации материала на минимальное значение момента инерции; v_i – параметр векового уравнения.

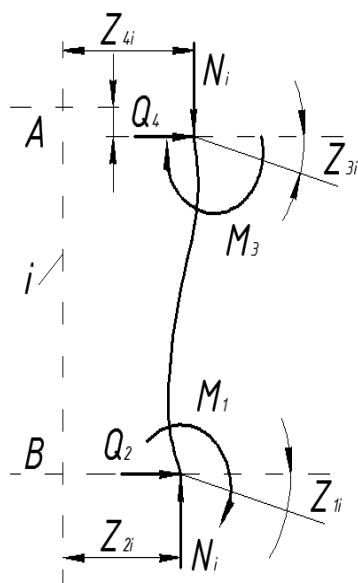


Рис. 1. Стержень, выделенный из системы

Fig. 1. Core isolated from the system

Определяем значение параметра векового уравнения устойчивости, при котором детерминант системы (2) равен 0:

$$Det = 0. \quad (4)$$

С применением приведенных выше системы стандартных неравенств и уравнений определим критические параметры формы бифуркации и устойчивости элементов спроектируемой конструктивной системы. Большое внимание представляет оценка влияния расчетной длины отдельных стержней и схемы нагружения на характер бифуркации как конкретных элементов, так и всей системы в целом.

Для исследования влияния значения расчетной стойки на критические параметры устойчивости системы запишем выражение для определения коэффициента векового уравнения вторичной расчетной схемы $v_{i_{кр}}$, возника-

ющей после изменения условий закрепления и сопряжения отдельных элементов.

$$v_{i_{кр}} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_{red}}}. \quad (5)$$

Параметр векового уравнения устойчивости первичной расчетной схемы будет соответственно равен:

$$v_{i_0} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_0}}. \quad (6)$$

Отношение квадратов начального и критического параметров стандартного векового уравнения равно отношению соответствующих критических сил:

$$\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} = \frac{P_{кр.}}{P_{кр.,0}}. \quad (7)$$

Параметры v_{i_0} и $v_{i_{кр}}$ определяются при выполнении расчета рамы на устойчивость по стандартным правилам строительной механики после и до изменения расчетной длины стоек.

Пользуясь соотношением (7), можно оценить влияние изменения расчетной длины стоек рамы на критические параметры всей системы, что, в свою очередь, позволяет, варьируя геометрией конструкции, влиять на ее работоспособность. Чем больше значение $\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2}$, тем более вероятна потеря устойчивости рамы в целом.

Количественный анализ. В качестве примера определим критические параметры устойчивости деревянной двухпролетной рамы, в которой к центральному элементу (к стойке 2) приложена сосредоточенная сжимающая сила $P_{кр}$, а к крайним – приложены силы $\alpha P_{кр}$ (рис. 2, 3).

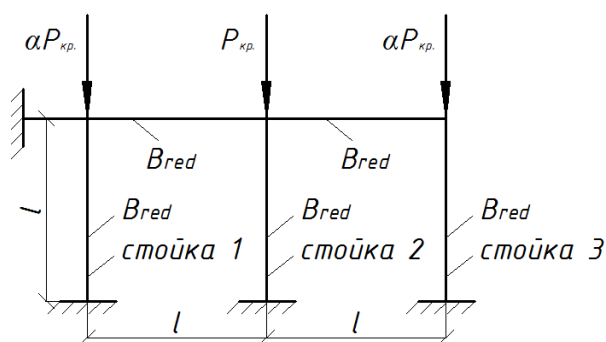


Рис. 2. Схема проектируемой рамы

Fig. 2. The design scheme of the frame

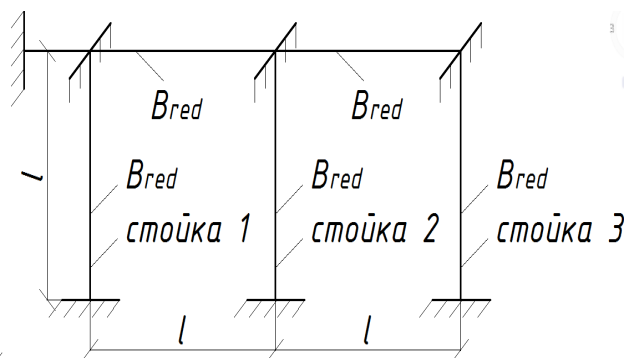
Рис. 3. Основная система
метода перемещений

Fig. 3. The basic system of displacement method

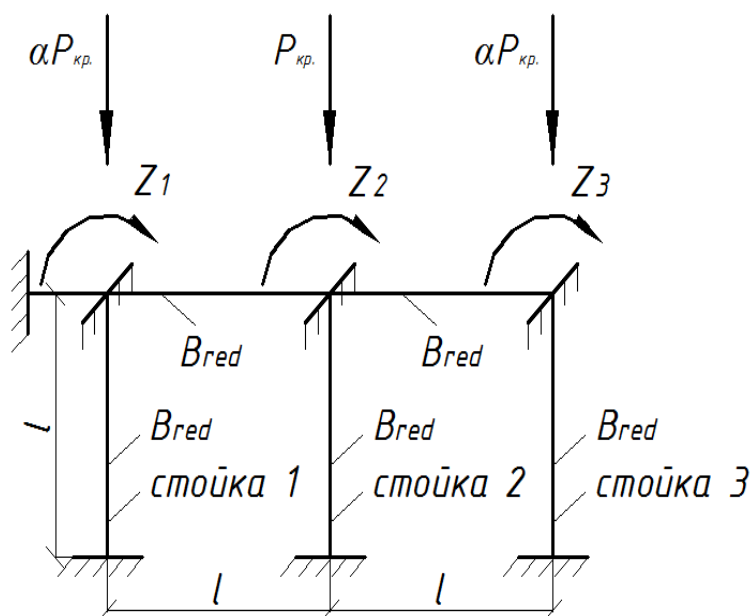


Рис. 4. Эквивалентная системы метода перемещений

Fig. 4. Equivalent system of displacement method

Выявляем вид бифуркации в элементах спроектируемой рамно-стержневой конструктивной системы. Вычисление скрытых внутренних усилий и реакций системы получаем при помощи типовых функций метода перемещений. Если принять за неизвестные углы пово-

рота узлов Z_1 , Z_2 , Z_3 (рис. 4), однородная система уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_2 + r_{13} \cdot Z_3 &= 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_2 + r_{23} \cdot Z_3 &= 0 \\ r_{31} \cdot Z_1 + r_{32} \cdot Z_2 + r_{33} \cdot Z_3 &= 0 \end{aligned} \right\}, (8)$$

где $r_{11} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)$;
 $r_{22} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2)$;
 $r_{33} = 4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)$;

$$\begin{aligned} r_{12} &= r_{23} = 2 \cdot i; \\ r_{13} &= r_{31} = 0; \\ v_i &= l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}(w,t)}}, \quad (i = 1, 2, 3). \end{aligned}$$

где B_{red} — жесткость поперечного сечения стержня, определяемая как произведение модуля деформаций материала на минимальное значение момента инерции; v_i — параметр векового уравнения.

После сокращений и преобразований выражение для определения детерминанта системы (8) примет вид:

$$\begin{aligned} Det &= (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot (8 \cdot i + \\ &+ 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2)) \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)) + \\ &+ 16 \cdot i^3 - (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot 4 \cdot i^2 - \\ &- 4 \cdot i^2 \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)). \end{aligned} \quad (9)$$

Пользуясь выведенными уравнениями, получаем критические параметры и определяем форму потери устойчивости спроектированной рамно-стержневой конструктивной системы.

Помимо этого, проанализировав изменение значения критической силы при изменении расчетной длины всех стоек рамы, в действительности можно предположить, что при действии силовых факторов увеличение или уменьшение расчетной длины стоек, теряющих устойчивость активно и пассивно, влияет на общую бифуркацию системы.

Для выполнения предложенной задачи определяем параметр векового уравнения $v_{i_{кр}}$, который, в свою очередь, определяется после проявления аварийной ситуации, в связи с этим расчетная длина стоек:

$$v_{i_{кр}} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_{red}}}. \quad (10)$$

Полученный параметр векового уравнения при заданном и не изменяемом значении нагрузки в добавок с постоянным значением влажностных характеристик древесины будет равен

$$v_{i_0} = l \cdot \sqrt{\frac{P}{B_0}}. \quad (11)$$

Отношение квадратов начального и критического параметров векового уравнения получаем прямую зависимость к отношению соответствующих критических сил:

$$\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2} = \frac{P_{кр.}}{P_{кр.,0}}. \quad (12)$$

Параметры v_{i_0} и $v_{i_{кр}}$ определяются при расчете предложенной спроектируемой рамно-стержневой системы на устойчивость по стандартным правилам строительной механики после и до изменения расчетной длины стоек.

Пользуясь соотношением (12), можно оценить влияние изменения расчетной длины стоек рамы на критические параметры всей системы, что в свою очередь позволяет, варьируя геометрией конструкции, влиять на ее работоспособность. Чем больше значение $\frac{v_{i_{кр}}^2}{v_{i_0}^2}$, тем более вероятна потеря устойчивости рамы в целом.

Для анализа влияний изменения расчетных длин каждой из стоек рамы заменим жесткое опирание шарнирно-неподвижным. Расчетная схема рамы для указанного случая представлена на рис. 5.

Основанная и эквивалентная системы метода перемещений разработаны аналогично с представленными выше (см. рис. 3, 4). Однородная система уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_2 + r_{13} \cdot Z_3 &= 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_2 + r_{23} \cdot Z_3 &= 0 \\ r_{31} \cdot Z_1 + r_{32} \cdot Z_2 + r_{33} \cdot Z_3 &= 0 \end{aligned} \right\}, (13)$$

где $r_{11} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_1(v_1)$;

$$r_{22} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2);$$

$$r_{33} = 4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3);$$

$$r_{12} = r_{23} = 2 \cdot i;$$

$$r_{13} = r_{31} = 0;$$

$$v_i = l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}(w, t)}}, \quad (i = 1, 2, 3).$$

Детерминант системы (10) определяется выражением:

$$\begin{aligned} Det = & (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_1(v_1)) \cdot (8 \cdot i + \\ & + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2) \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)) + \\ & + 16 \cdot i^3 - (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_1(v_1)) \cdot 4 \cdot i^2 - \\ & - 4 \cdot i^2 \cdot (4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)). \end{aligned} \quad (14)$$

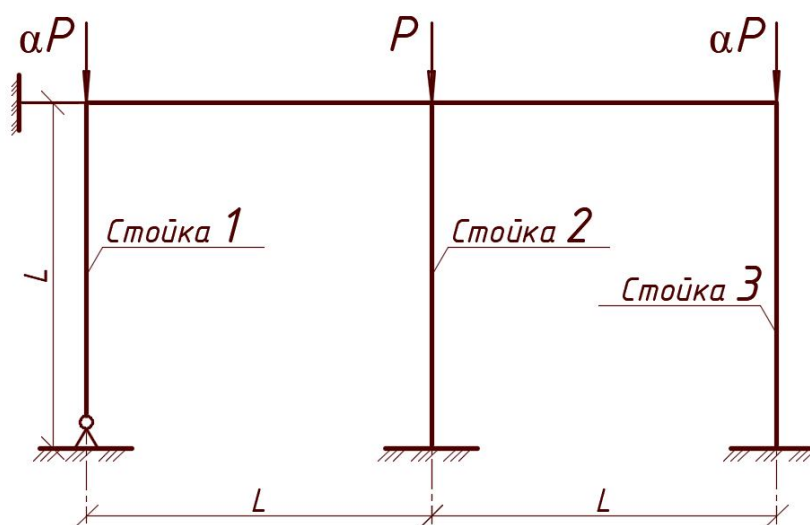


Рис. 5. Расчетная схема рамы при изменении расчетной длины стойки 1

Fig. 5. The design scheme of the frame when changing the estimated length of the rack 1

Аналогично выполнен расчет изменения критических параметров устойчивости рассматриваемой рамно-стержневой конструктивной системы (см. рис. 2) при изменении расчетных длин стоек 2 и 3.

Результаты указанного расчета приведены на рис. 6. Вертикальными линиями ограничены зоны активной и пассивной бифуркации стоек 1 и 3, стойка 2 теряет устойчивость активно, незави-

симо от значения параметра приложения нагрузки α .

Результаты и их обсуждение

Из анализа рис. 6 можно сделать вывод, что при значении $\alpha \leq 0,756$ левая и правая стойки конструктивной системы теряют устойчивость пассивно. В случае, когда параметр приложения нагрузки α превышает значение 0,756, стойка 3 рассматриваемой рамы переходит к активной бифуркации, при

$\alpha > 0,9$ все стойки теряют устойчивость активно. Вместе с тем при значении $\alpha \leq 0,9$, когда стойка 1 теряет устойчивость пассивно, изменение ее расчетной длины приводит к уменьшению критической силы в среднем на 15%. В случае, когда параметр приложения нагрузки α превышает значение 0,9, изменение расчетной длины элемента 1 приводит к увеличению максимального значения сжимающей силы на 5%.

В то же самое время при значении $\alpha \leq 0,76$, когда стойка 3 теряет устойчивость пассивно, изменение ее расчетной длины приводит к уменьшению критической силы в среднем на 6%. В случае, когда параметр приложения нагрузки α превышает значение 0,76, изменение расчетной длины элемента 3 приводит к увеличению максимального значения сжимающей силы на 2%.

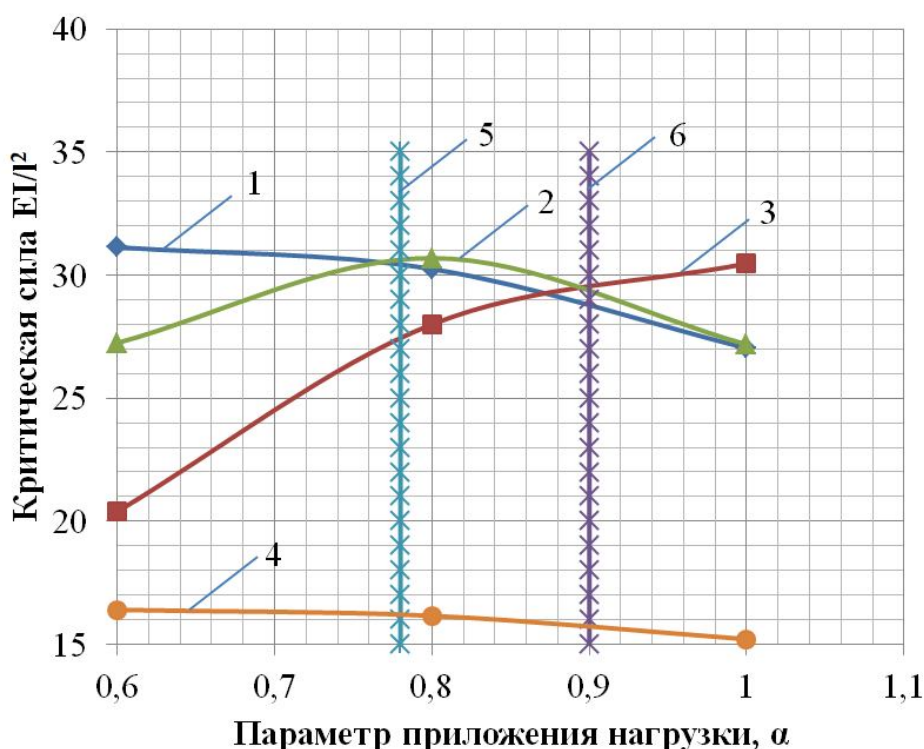


Рис. 6. График зависимости значения критической силы $P_{кр,0}$ от параметра приложения нагрузки α при изменении расчетной длины стоек рамно-стержневой системы с указанием характера бифуркации:

- 1 – расчетная длина всех элементов рамы одинакова, 2 – уменьшение расчетной длины стойки 3 на 30%; 3 – уменьшение расчетной длины стойки 1 на 30%; 4 – уменьшение расчетной длины стойки 2 на 30%; 4 – граница перехода стойки 3 от пассивной потери устойчивости к активной;
- 5 – граница перехода стойки 1 от пассивной потери устойчивости к активной

Fig. 6. Graph of the dependence of the value of the critical force $P_{(cr., 0)}$ on the load application parameter α when changing the estimated length of the racks of the frame-rod system indicating the nature of the bifurcation: 1 - the calculated length of all frame elements is the same, 2 - reducing the estimated length of the rack 3 by 30%; 3 - reduction of the estimated length of the rack 1 by 30%; 4 - reduction of the estimated length of the rack 2 by 30%; 4 - the border of the transition rack 3 from passive loss of resistance to active;

5 - the border of the transition rack 1 from passive loss of resistance to active

При этом изменение расчетной длины второй стойки приводит к уменьшения критической силы в среднем на 50%.

Выводы

Представлены достаточно простые алгебраические зависимости, позволяющие выявлять элементы равно-

стержневых систем, изменение расчетной длины которых оказывает существенное влияние на критические параметры устойчивости всей конструкции. При этом приведенные критерии позволяют оценивать ресурс сопротивления центрально сжатых элементов равностержневых конструктивных систем.

Список литературы

1. Александров А. В., Травуш В. И., Матвеев А. В. Исследование устойчивости конструкций арочного покрытия зала с использованием критериев выявления наиболее опасных элементов // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2004. Вып. 8. С. 14—21.
2. Александров А. В., Матвеев А. В. Критерии выявления наиболее опасных элементов и их использование в задачах устойчивости конструкций // Безопасность движения поездов: тр. 4-й науч.-практ. конф. М.: МИИТ, 2003. С. III—1 — III—2.
3. Александров А. В., Травуш В. И., Матвеев А. В. О расчете стержневых конструкций на устойчивость // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 3. С. 16—20.
4. Александров А. В. Роль отдельных элементов стержневой системы при потере устойчивости // Вестник МИИТа. 2001. Вып. 5. С. 46.
5. Матвеев А. В. Некоторые вопросы создания специализированного программного комплекса для анализа мостовых конструкций // Вестник МИИТа. 2002. Вып. 7. С. 76—83.
6. Пятикрестовский, К. П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций. М.: МГСУ, 2014. 320 с.
7. Пятикрестовский К. П., Травуш В. И. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 115—119.
8. Пятикрестовский К. П., Хуганов Х.С. Нелинейные деформации статически неопределимых деревянных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 11-12. С. 21—30.

9. Ключева Н.В., Дмитриева К.О. Вопросы устойчивости стержневых элементов конструктивных систем из древесины при силовом и средовом нагружении // Строительство и реконструкция . 2016. №4. С. 13-18.

10. Дубракова К.О. Вопросы устойчивости статически неопределимых систем из древесины // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. №11. С. 54-55.

11. Ключева Н.В., Дмитриева К.О. Анализ устойчивости стержневых конструкций из древесины при силовом нагружении и переменной влажности // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. №3. С. 17-24.

12. Ключева Н.В., Дмитриева К.О. Вопросы устойчивости стержневых элементов конструктивных систем из древесины различных пород при силовом и средовом нагружении в условиях повышенной влажности // Строительство и реконструкция . 2016. №5. С. 60-68.

References

1. Aleksandrov A.V. Issledovanie ustoichivosti konstruksii arochnogo pokrytiya zala s ispol'zovaniem kriteriev vyyavleniya naibolee opasnykh elementov [Investigation of the sustainability of structures of the arch covering of the hall using the criteria for identifying the most dangerous elements]. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN*, 2004, vol. 8, pp. 14-21 (In Russ.).

2. Aleksandrov A.V., Matveev A.V. [Criteria for identifying the most dangerous elements and their use in problems of structural stability]. *Bezopasnost' dvizheniya poezdov. Tr. 4-i nauch.-prakt. konf.* [Safety of train traffic. Tr. 4th scientific-practical. conf.]. Moscow, 2003, pp. III — 1 — III — 2 (In Russ.).

3. Aleksandrov A.V., Travush V.I., Matveev A.V. O raschete sterzhnevyykh konstruksii na ustoichivost' [On the calculation of stability of core structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Construction*, 2002, no. 3, pp. 16-20 (In Russ.).

4. Aleksandrov A. V. Rol' otdel'nykh elementov sterzhnevoi sistemy pri potere ustoichivosti [The role of individual elements of the core system in the event of loss of stability]. *Vestnik MIITa = Bulletin of Moscow Institute of Railway Transport*, 2001, vol. 5, p. 46 (In Russ.).

5. Matveev A. V. Nekotorye voprosy sozdaniya spetsializirovannogo programmnoy kompleksa dlya analiza mostovykh konstruksii [Some issues of creating a specialized soft-

ware for the analysis of bridge structures]. *Vestnik MII Ta = Bulletin of Moscow Institute of Railway Transport*, 2002, vol. 7, pp. 76-83 (In Russ.).

6. Dubrakova K.O. Voprosy ustoichivosti staticheskii neopredelimykh sistem iz drevesiny [Questions of sustainability of statically indefinable systems of wood]. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction equipment*, 2018, no.11, pp. 54-55 (In Russ.).

7. Pyatikrestovsky K. P., Travush V. I. O programmirovanii nelineinogo metoda rascheta derevyannykh konstrukttsii [On programming non-linear method of calculating wooden structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo = Academia. Architecture and construction*, 2015, no. 2, pp. 115-119 (In Russ.).

8. Pyatikrestovsky K. P., Khuganov H.S. Nelineinye deformatsii staticheskii neopredelimykh derevyannykh konstrukttsii [Nonlinear deformations of statically indefinable wooden structures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = Proceedings of higher educational institutions. Building*, 2013, no. 11-12, pp. 21-30 (In Russ.).

9. Klyueva N.V., Dmitrieva K.O. Voprosy ustoichivosti sterzhnevnykh elementov konstruktivnykh sistem iz drevesiny pri silovom i sredovom nagruzhenii [Questions of sustainability of core elements of structural systems made of wood under force and environmental loading]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and reconstruction*, 2016, no.4, pp. 13-18 (In Russ.).

10. Pyatikrestovsky K.P. Nelineinye metody mekhaniki v proektirovanii so-vremennykh derevyannykh konstrukttsii [Nonlinear methods of mechanics in the design of modern wooden structures]. Moscow, MGSU Publ., 2014, 320 p. (In Russ.).

11. Klyueva N.V., Dmitrieva K.O. Analiz ustoichivosti sterzhnevnykh konstrukttsii iz drevesiny pri silovom nagruzhenii i peremennoi vlazhnosti [Analysis of the stability of wood core structures under power loading and variable humidity]. *Nauchnyi vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*, 2016, no.3, pp. 17-24 (In Russ.).

12. Klyueva N.V., Dmitriev K.O. Voprosy ustoichivosti sterzhnevnykh elementov konstruktivnykh sistem iz drevesiny razlichnykh porod pri silovom i sredovom nagruzhenii v usloviyakh povyshennoi vlazhnosti [Questions of sustainability of the core elements of structural systems of wood of various species under force and environmental loading in conditions of high humidity]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and reconstruction*, 2016, no.5, pp. 60-68 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Yekaterina G. Pakhomova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Dean of the Construction and Architecture Faculty, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

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

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

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

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 Construction, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-84-92>

Оценка качества земельных ресурсов и их альтернативное использование при реализации программ застройки территории

А.В. Шлеенко ¹ ✉, С.Н. Волкова ², Е.Е. Сивак ²

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

² ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова», ул. Карла Маркса, 70, г. Курск, 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: shleenko77@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является установление зависимости между стандартами современного строительства, связанными с зональностью почв и активностью микроорганизмов, усиливающих азот на МПА и КАА, необходимых для здорового функционирования окружающей среды.

Методы. На сегодняшний день в эпоху индустриальных технологий особенно актуальным стал вопрос максимально эффективного использования как промышленных, так и природных ресурсов. Эффективность использования заключается не только в максимизации прибыли, извлекаемой из объектов индустриализации, но и в оптимизации при взаимодействии таких компонентов народнохозяйственного эффекта, как совокупности информационной базы для расчета эффективности, определения эффекта проектирования строительства как доли в общем эффекте проекта индустриализации, а так же учета социальных и экологических последствий инвестиционного проекта. Иерархия оценочных параметров на сегодняшний день существенно отличается от оценок ранних периодов реализации проектов и социальная составляющая в настоящее время является определяющей. При расчете и построении моделей использовались статистические методы контроля и корреляционно-регрессионный анализ.

Результаты. К социальным результатам реализации строительных проектов является улучшение как жилищных, так и культурно-бытовых условий людей, улучшение условий труда, оптимизация снабжения населенных пунктов отдельными видами товаров и услуг, улучшение уровня жизни при минимальной нагрузке на окружающую среду, являющуюся объектом, на который направлен проект индустриализации. В работе по установленным зависимостям разработаны возможности альтернативного использования земельных ресурсов зависимости от потенциальной активности хемоорганотрофных бактерий и актиномицетов, генезиса почв, предполагаемых для застройки, на территориях, отчуждаемых для этих целей.

Заключение. Для сохранения земельных ресурсов и плодородного слоя почвы со временем еще актуальнее становится решение одной из важнейших задач для современного общества. А именно создание комфортной среды обитания для человека, поддержание биологического круговорота, вовлечение в него новых параметров оценки с целью улучшения качества и продолжительности жизни.

Ключевые слова: земельные ресурсы; строительство; стандарты; микробиологическая активность; альтернативное использование.

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

© Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Сивак Е.Е., 2019

Для цитирования: Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Сивак Е.Е. Оценка качества земельных ресурсов и их альтернативное использование при реализации программ застройки территории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 84-92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-84-92>.

Статья поступила в редакцию 04.06.2019

Статья подписана в печать 18.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-84-92>

Assessment of Land Resources Quality and Their Alternative Use in the Implementation of Building Development Programs

Aleksey V. Shleenko ¹ ✉, Svetlana N. Volkova ², Elena E. Sivak ²

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

² Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, 70, Karla Marksa str., Kursk, 305021, Russian Federation

✉ e-mail: shleenko77@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of our study is to establish the relationship between the standards of modern construction related to soil zoning and the activity of microorganisms that enhance nitrogen on MPA and KAA, and which are necessary for the healthy functioning of the environment.

Methods. At present, in the era of industrial technology the problem of the most efficient use of both industrial and natural resources has become a particularly relevant one. The efficient use lies not only in maximizing profit obtained from the objects of industrialization, but also in optimizing the interaction of such components of economic efficiency as the collections of the information base for calculation of efficiency, determining the effect of design construction as a proportion of total effect of the industrialization project. Social and environmental impacts of the investment project should also be taken into account. Today, the hierarchy of evaluation parameters is significantly different from the estimates of the early periods of project implementation and the social component is now a decisive one. Statistical methods of control and correlation and regression analysis were used in the calculation and construction of models.

Results. The social results of construction projects implementation is improving housing, working and cultural conditions of people, optimising the supply of settlements with certain goods and services, improving standard of living with minimal impact on the environment, which is the object targeted by the project of industrialization. The study develops the possibilities of alternative use of land resources depending on potential activity of chemoorganotrophic bacteria and actinomycetes, genesis of soils supposed for building in the territories alienated for these purposes.

Conclusion. The solution of one of the most important tasks in order to preserve land resources and fertile soil layer for modern society becomes even more urgent over time. Namely, this is the task of creating a comfortable living environment for humans, the maintenance of the biological cycle, the involvement of new assessment parameters in order to improve the quality and life expectancy.

Keywords: land resources; construction; standards; microbiological activity; alternative use.

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

For citation: Shleenko A. V., Volkova S. N., Sivak E. E. Assessment of Land Resources Quality and Their Alternative Use in the Implementation of Building Development Programs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 84-92 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-84-92>.

Received 04.06.2019

Accepted 18.07.2019

Введение

Для рационального использования земельных ресурсов помимо окультуривания почвы или безрассудной её застройки необходимо провести мониторинг для установления степени комфортности ландшафта будущего.

В связи с этим целью нашей работы является установление зависимости между стандартами современного строительства, связанных с зональностью почв и активностью микроорганизмов, усиливающих азот на МПА и КАА, необходимых для здорового функционирования окружающей среды.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– нахождение показателей, определяющих качественные характеристики аккумуляции или разрушения органического вещества как основы для оценки дальнейшего использования земельных ресурсов, с учетом зональности и окультуренности почв, а так же экономической целесообразности точечных застроек (табл. 1);

– установление зависимости между показателем, характеризующим процессы аккумуляции гумуса от активности бактерий, с предложением о возможности вывода почв из биологического кругооборота с низкими показателями аккумуляции под застройку объектами современной инфраструктуры (модели (2)-(4)).

Таблица 1

Ассимиляционная активность почвы верхних горизонтов воздействием естественных процессов предполагаемых к отчуждению под строительство [1, с.25]

Table 1

Assimilatory activity of top horizon soils assumed to alienation under construction from the impact of natural processes [1, page 25]

Угодья	Зональность почв №	Микроорганизмы, усиливающие азот, млн. микроорганизмов на 1 га абс. сухой почвы		$\frac{МПА}{КАА}$	Общее кол-во микроорганизмов	ПИН
		МПА	КАА			
Grounds	Zonality of soils No.	The microorganisms strengthening nitrogen, one million microorganisms per 1 hectare of absolutely dry soil		$\frac{MPA}{KAA}$	Total number of microorganisms	PIN
		MPA	KAA			
Целинные земли, Лесные угодья, Залежные земли	1 ДП	0,8	1,24	0,645	2,04	1,32
	2 СС	1,92	9,34	0,206	11,23	2,31
	3 ЧТ	7,05	21,14	0,333	28,19	9,40
	4 ТК	6,75	12,95	0,521	19,7	10,27
	5 КФ	14,44	32,96	0,438	47,4	20,86

Окончание табл. 1 / The end of table 1

Угодья	Зональность почв №	Микроорганизмы, усиливающие азот, млн. микроорганизмов на 1 га абс. сухой почвы		$\frac{МПА}{КАА}$	Общее кол-во микроорганизмов	ПИН
		МПА	КАА			
Grounds	Zonality of soils No.	The microorganisms strengthening nitrogen, one million microorganisms per 1 hectare of absolutely dry soil		$\frac{MPA}{KAA}$	Total number of microorganisms	PIN
		MPA	KAA			
Virginlands, Forestlands, Laylands	1 SC	0,8	1,24	0,645	2,04	1,32
	2 LS	1,92	9,34	0,206	11,23	2,31
	3 CT	7,05	21,14	0,333	28,19	9,40
	4 DS	6,75	12,95	0,521	19,7	10,27
	5 RF	14,44	32,96	0,438	47,4	20,86
Σ	5 типов	30,96	83,6	2,113	108,51	44,16
Σ	5 types	30,96	83,6	2,113	108,51	44,16
Почвы, находящиеся под пашней	ДП	0,5	1,76	0,284	2,26	0,64
	СС	2,04	17,26	0,118	19,3	2,28
	ЧТ	7,32	37,94	0,193	45,26	8,73
	ТК	7,06	14,17	0,498	21,23	10,58
	КФ	25,12	96,86	0,259	121,98	31,60
Soils which are under an arable land	SC	0,5	1,76	0,284	2,26	0,64
	LS	2,04	17,26	0,118	19,3	2,28
	CT	7,32	37,94	0,193	45,26	8,73
	DS	7,06	14,17	0,498	21,23	10,58
	RF	25,12	96,86	0,259	121,98	31,60
Σ	5 типов	42,04	167,99	1,352	210,03	53,83
Σ	5 types	42,04	167,99	1,352	210,03	53,83
Почвы, находящиеся под пашней интенсивного использования	ДП	1,74	2,61	0,667	4,35	2,90
	СС	2,91	20,12	0,145	23,03	3,83
	ЧТ	8,09	43,02	0,188	51,11	9,61
	ТК	9,48	17,24	0,55	26,78	14,82
	КФ	25,05	55,40	0,452	80,45	36,38
Soils which are under an arable land of intensive use	SC	1,74	2,61	0,667	4,35	2,90
	LS	2,91	20,12	0,145	23,03	3,83
	CT	8,09	43,02	0,188	51,11	9,61
	DS	9,48	17,24	0,55	26,78	14,82
	RF	25,05	55,40	0,452	80,45	36,38
Σ	5 типов	47,27	138,39	2,002	185,72	67,54
Σ	5 types	47,27	138,39	2,002	185,72	67,54

В табл. 1 в колонке зональность почв следующие обозначения типов почв в зависимости от их генезиса: ДП – дерново-среднеподзолистая почва; СС – светло-серая почва; ЧТ – чернозем типичный; ТК – тёмно-каштановая слабосолонцеватая почва; КФ – красно-желтая ферраллитная типичная почва. ПИН – показатель интенсивности и направленности микробиологических процессов почвообразования, т.е. процессов аккумуляции, который определяется по формуле (1) [2, с. 86].

In table 1, in a column “zonality of soils” there are the following designations of types of soils depending on their genesis: SC – the sod-podzolic soil; LS – the light gray soil; CT – the chernozem typical; DS – the dark-chestnut soil; RF – the red-yellow ferrallitny typical soil. The PIN – an indicator of intensity and orientation of microbiological processes of soil formation i.e. processes of accumulation which is determined by a formula (1) [2, p. 86].

$$\text{ПИН} = (x + y) \cdot \frac{x}{y}, \quad (1)$$

где x – количество микроорганизмов на МПА;

y – количество микроорганизмов на КАА;

$x+y$ – общее количество микроорганизмов на МПА и КАА, характеризующих интенсивность процесса почвообразования;

$\frac{x}{y}$ – соотношение количества микроорганизмов на МПА к КАА, характеризующих направленность процессов почвообразования.

Разделить микроорганизмы трудно, поскольку тесная связь между взаимопревращениями, а именно $r_{xy}=0,83$ для интенсивной пашни и будет функциональная связь $r_{xy}=0,96$ и $r_{xy}=0,97$ для целинных земель и пашни соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Связь между микроорганизмами; усиливающими аккумуляцию гумуса (азот) на МПА и на КАА (x_i – млн. микроорганизмов на 1 га сухой почвы на МПА и y_i – соответственно на КАА)

Table 2

Relationship between microorganisms strengthening accumulation of a humus (nitrogen) on MPA and on KAA (x_i – one million microorganisms per 1 hectare of dry soil on MPA and y_i – respectively on KAA)

п/п	Земельные угодья	r_{xy}	$b_{y/x}$	Уравнение прямой регрессии	
				$y=f(x)$ КАА от МПА	$x=f(y)$ МПА от КАА
p/o	Landgrounds	r_{xy}	$b_{y/x}$	Equation of direct regression	
				$y=f(x)$ КАА from MPA	$x=f(y)$ КАА from MPA
1	Целинные земли	0,96	2,15	$y=2,15x+3,41$	$x=0,424y-0,897$
1	Virginlands	0,96	2,15	$y=2,15x+3,41$	$x=0,424y-0,897$
2	Пахотные земли	0,97	3,72	$y=3,72x+2,32$	$x=0,253y-0,093$
2	Arablelands	0,97	3,72	$y=3,72x+2,32$	$x=0,253y-0,093$
3	Пахотные земли интенсивного использования	0,83	1,88	$y=1,88x+9,91$	$x=0,364y-0,611$
3	Arablelands intensive use	0,83	1,88	$y=1,88x+9,91$	$x=0,364y-0,611$

Поэтому целесообразно рассматривать в целом их одновременное влияние на интенсивность и направленность мик-

робиологических процессов, что выражается в показателях ПИН.

С увеличением микроорганизмов на 1 млн. на 1 га сухой почвы на МПА происходит на КАА увеличение на 2,15; 3,72; 1,88 млн. на 1 га сухой почвы соответственно на целинных землях, пашне, интенсивной пашне. Почти в 2 раза быстрее по сравнению с целиной и интенсивной пашней происходят процессы на пахотных землях по приросту микроорганизмов на КАА от МПА.

Построенные модели зависимости между показателем, характеризующим процессы почвообразования от биологической активности, и генезиса, с учетом окультуренности почв и найденной зависимости имеют вид:

Целина:

$$ПИН = \frac{3,15x^2 + 3,41x}{2,15x + 3,41}; x \in [0,8; 14,44]. (2)$$

Пашня:

$$ПИН = \frac{4,72x^2 + 2,32x}{3,72x + 2,32}; x \in [0,5; 25,12]. (3)$$

Интенсивная пашня:

$$ПИН = \frac{2,88x^2 + 9,91x}{1,88x + 9,91}; x \in [1,74; 25,05],$$

(4)

где x – микроорганизмы, усиливающие азот (млн. микроорганизмов на 1 га сухой почвы).

Результаты и их обсуждение

Результаты наших расчетов показывают, что в почве [1-5], идет непрерывное развитие, что отражается на социально-экологическом состоянии экосистемы. Поэтому целесообразно под строительство отчуждать земельные участки с показателем ПИН от минимального значения до 2,9 с показателем направленности (отношение МПА/КАА) от

0,284 до 0,667, по интенсивности процесса почвообразования (МПА+КАА) от 2,014 до 3,75) такие участки менее всего пригодны для сельскохозяйственного использования, в них преобладают процессы дессимиляции и они могут без ущерба для экоценоза быть отчуждаемы под строительство. В случае же отчуждения земель с более высокими показателями расчетных коэффициентов, ущерб будет нанесен как для растительности, так и для животного мира [6-8]. Целью нашей работы было показать не только значимость земельных ресурсов как универсального показателя социально-экономического состояния территории, но и обосновать необходимость и значимость современных проектных решений, через эту же призму измерений, а именно социально-экологического состояния территорий [9-11].

Выводы

По установленной функциональной связи между микробиологической активностью, участвующей в малом биологическом круговороте, а именно трансформации и минерализации азотсодержащих соединений, с учетом окультуренности земель (табл. 2) найдены показатели оценки процессов эволюции и деградации почв для вовлечения их в проекты по застройке территорий.

По найденной связи между микроорганизмами, влияющими на процессы почвообразования и минерализации азотсодержащих соединений построенные модели (2) – (4) с учетом воздействия используемых площадей позволяют

провести мониторинг территории для альтернативного её использования.

Список литературы

1. Волкова С.Н., Муха Д.В. Моделирование и прогнозирование эволюционных процессов в социально-экологических системах. Курск, 2009. 153 с.
2. Муха В.Д. Естественнo-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности). М.: Колос, 2004. 271с.
3. Волкова С.Н., Муха Д.В. Прогнозирование и числовые характеристики непрерывных циклических процессов экосистемы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1996. № 1. 17 с.
4. Волкова С.Н., Муха Д.В. Феномен плодородия и эволюция биосферы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1997. № 1. 29 с.
5. Муха В.Д., Волкова С.Н., Муха Д.В. Критерий эффективности эколого-экономической безопасности // Повышение эффективности и конкурентоспособности сельского хозяйства в условиях формирования открытой экономики: материалы международной научно-практической конференции. Курск, 2003. С. 49-51.
6. Пат. 2417957 Российская Федерация, МПК С 02 F 101/00. Способ определения нормативов допустимого воздействия загрязняющих веществ на водные объекты / Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Панченко И.В., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Курская ГСХА». № 2009122978/05; заявл. 16.06.2009, опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13. 10 с.
7. Пат. 2480747 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/18 Способ определения норматива предельно допустимой концентрации загрязняющих веществ на водные объекты / Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Потемкин С.Н., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Курская ГСХА». № 2011115673/15, заявл. 20.04.2011; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. 6 с.
8. Пат. 2481574 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/18 Способ определения допустимого количества микробиологических показателей в водных объектах / Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Потемкин С.Н., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Курская ГСХА»
9. Анализ динамики регионального развития экосистем / С.Н. Волкова, Е.Е. Сивак, М.И. Пашкова, В.В. Герасимова А.В. Шлеенко // Региональный Вестник. 2016. №1(2). С. 33-36.
10. Гранкин В.Ф., Шлеенко А.В. Аспекты управления землями крупного города в рыночных условиях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №6(45). С. 193-200.
11. Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Сивак Е.Е. Методы прогнозирования последствий антропогенного воздействия на окружающую среду // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. Ч. 2. С. 183-186.

References

1. Volkova S.N., Mucha D.V. Modelirovanie i prognozirovanie evolyutsionnykh protsessov v sotsial'no-ekologicheskikh sistemakh [Modeling and forecasting of evolutionary processes in social-and-ecological systems]. Kursk, 2009, 153 p. (In Russ.).
2. Mucha V.D. Estestvenno-antropogennaya evolyutsiya pochv (obshchie zakonomernosti i zonal'nye osobennosti) [Natural and anthropogenous evolution of soils (general regularities and zone features)]. Moscow, Ear Publ., 2004, 271 p. (In Russ.).
3. Volkova S.N., Mucha D. W. Prognozirovanie i chislovye kharakteristiki nepre-ryvnykh tsiklicheskh protsessov ekosistemy [Forecasting and numerical characteristics of continuous cyclic processes of an ecosystem]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokho-zyaistvennykh nauk = Reports of the Russian academy of agricultural sciences*, 1996, no. 1. 17 p. (In Russ.).
4. Volkova S.N., Mucha D. V. Fenomen plodorodiya i evolyutsiya biosfery [Fenomen of fertility and evolution of the biosphere]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistven-nykh nauk = Reports of the Russian academy of agricultural sciences*, 1997, no. 1. 29 p. (In Russ.).
5. Mucha V.D., Volkova S.N., Mucha D. V. [Kritery of efficiency of ekologo-economic security]. *Povyshenie effektivnosti i konkurentosposobnosti sel'skogo khozyaistva v uslovi-yakh formirovaniya otkrytoi ekonomiki. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Increase of efficiency and competitiveness of agriculture in the conditions of formation of open economy]. Materials of the international scientific and practical confer-ence]. Kursk, 2003, pp. 49-51 (In Russ.).
6. Pat. 2417957 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C 02 F 101/00. Sposob opredeleniya normativov dopustimogo vozdeistviya zagryaznyayushchikh veshchestv na vodnye ob"ekty. Stalemate. 2417957 Russian Federation, MPK C 02 F 101/00. A way of definition of stand-ards of admissible impact of the polluting substances on water objects of / Volkov S.N., Si-vak E.E. Panchenko I.V., applicant and patent holder FGBOU VPO "Kursk GSHA". No. 2009122978/05; заявл. 16.06.2009, опубл. 10.05.2011, Bulletin No. 13. 10 p. (In Russ.).
7. Pat. 2480747 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 N 33/18 Sposob opredeleniya nor-mativa predel'no dopustimoi kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv na vodnye ob"ekty . Stalemate. 2480747 Russian Federation, MPK G 01 N 33/18 the Way of definition of the standard of maximum permissible concentration of the polluting substances on water objects of / Volkov S.N., Sivak E.E., Potemkin S.N., applicant and patent holder FGBOU VPO "Kursk GSHA". No. 2011115673/15, заявл. 20.04.2011; опубл. 27.04.2013, Bulletin No. 12. 6 p. (In Russ.).
8. Pat. 2481574 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01 N 33/18 Sposob opredeleniya dopustimogo kolichestva mikrobiologicheskikh pokazatelei v vodnykh ob"ektakh . Stalemate 2481574 Russian Federation, MPK G 01 N 33/18 the Way of definition of admissible quanti-

ty of microbiological indicators in water objects of [Text] / Volkov S.N., Sivak E.E. Potemkin S.N., the applicant and the patent holder FGBOU VPO "Kursk GSHA. (In Russ.).

9. Volkova S.N., Sivak E.E., Pashkova M. I., Gerasimova V. V., Shleenko A.V. Analiz dinamiki regional'nogo razvitiya ekosistem [Analysis of dynamics of regional development of ecosystems]. *Regional'nyi Vestnik = Regional Bulletin*, 2016, no. 1(2), pp. 33-36 (In Russ.).

10. Grankin V.F., Shleenko A.V. Aspekty upravleniya zemlyami krupnogo goroda v rynochnykh usloviyakh [Aspects of management of lands of the large city in market conditions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 6(45), pp. 193-200 (In Russ.).

11. Shleenko A.V., Volkov S. N., Sivak E.E. Metody prognozirovaniya posled-stvii antropogennogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu [Methods of forecasting of consequences of anthropogenous impact on environment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2012, no. 2, pt. 2, pp. 183-186 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Волкова Светлана Николаевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая кафедрой физико-математических дисциплин и информатики, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова», Курск, Российская Федерация, e-mail: volkova_47@mail.ru

Svetlana N. Volkova, Doctor Agricultural Sciences, Professor, Head of the Physics, Mathematics and Informatics Department, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: volkova_47@mail.ru

Сивак Елена Евгеньевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры стандартизации и оборудования перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова», Курск, Российская Федерация, e-mail: elenasivak77@mail.ru

Elena E. Sivak, Doctor Agricultural Sciences, Professor, Department of Standardization and Equipment of Processing Industries, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: elenasivak77@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-93-104>

Анализ организации защиты информации в России и других странах мира

А.Л. Ханис¹ ✉, Е.И. Щедрина¹, С.В. Спевачева¹

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

✉ e-mail: hanis.a_@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В данной статье рассматриваются различные способы защиты информации, применяющиеся в разных странах, а также проводится анализ и сравнение степени развития данной сферы в Российской Федерации. Приводится краткая история возникновения и последующая динамика развития этой области в разных государствах. Целью данной статьи является анализ законодательств различных стран (законов, подзаконных актов, указов), связанных со сферой информации и защитой персональных данных, и разработка метода, позволяющего повысить долю предотвращенных атак на информационные системы.

Методы. Была изучена специфика форм защиты информации в следующих странах: Российская Федерация, Соединенные Штаты Америки, Германия, Франция. В статье описываются существующие на сегодняшний момент глобальные международные стандарты по стандартизации мер и систем безопасности, относящиеся к системе под названием ISO/IEC 27000, и уровень их внедрения в России. В качестве метода исследования был выбран метод иерархий Саати.

Результаты. Проведенное исследование позволило выявить возможные недостатки защиты информационного поля России с помощью проведения аналогии с другими, более развитыми в данном аспекте странами. Законодательная база России содержит множество законов и постановлений, которые затрагивают тему защиты и обработки персональных данных пользователей, но их количество и четкость организации не является достаточной и требует улучшения.

Заключение. В ходе анализа был сделан вывод, что в России охране информационных данных уделяется значительное внимание, действует ряд федеральных законов, однако нормативно-правовая база Российской Федерации, целью которой является защита информации и персональных данных, имеет относительно небольшую историю развития и нуждается в доработке.

Ключевые слова: информационная безопасность; кибератака; законы об информационной безопасности; персональные данные.

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

© Ханис А.Л., Щедрина Е.И., Спевачева С.В., 2019

Для цитирования: Ханис А.Л., Щедрина Е.И., Спеваклова С.В. Анализ организации защиты информации в России и других странах мира // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 93-104. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-93-104>.

Статья поступила в редакцию 14.06.2019

Статья подписана в печать 05.08.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-93-104>

Analysis of the Information Security Arrangement in Russia and Other Countries

Andrey L. Hanis¹ ✉, Yekaterina I. Shhedrina¹, Svetlana V. Spevakova¹

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

✉ e-mail: hanis.a_@mail.ru

Abstract

Purpose of research. This article discusses various techniques for information security implementation used in certain countries; presents analysis and comparison of the degree of information security development in the Russian Federation. A brief history of the origin and subsequent dynamics of the development of this area in different countries is given. The objectives of this article are to analyze the legislation basis of different countries, namely the laws, regulations, decrees related to the sphere of information and personal data security and to develop a technique to increase the share of prevented attacks against information systems.

Methods. The peculiarities of forms of information security implementations in the Russian Federation, the United States of America, Germany, and France was studied. The article analyzes the current global international standards for standardization of security measures and systems related to the ISO / IEC 27000 system, and the level of their implementation in Russia. The method of Saati hierarchies was chosen as the research method.

Results. The conducted research allowed us to reveal possible shortcomings of information security implementation in Russia by means of drawing an analogy with other countries with a more developed information security systems. Russian legislative framework contains many laws and regulations that affect personal data protection and processing, but their number and arrangement clarity is not sufficient and needs to be enhanced.

Conclusion. As a result of the analysis it can be concluded that Russia pays considerable attention to information security implementation; different measures have been taken to its ensurance; a number of Federal laws have been enacted. However, the regulatory framework of the Russian Federation, the purpose of which is to protect information and personal data, has a relatively short history of development and needs enhancement.

Keywords: information security; cyberattack; information security laws; personal data.

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

For citation: Hanis A. L., Shhedrina Y. I., Spevakova S. V. Analysis of the Information Security Arrangement in Russia and Other Countries. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 93-104 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-93-104>.

Received 14.06.2019

Accepted 05.08.2019

Введение

Защита информации – одна из наиболее необходимых задач в функционировании целого государства и, соответственно, деятельности отдельно взятых крупных, либо небольших предприятий. В XXI веке этот факт считается вполне очевидным. Прежде чем приступать к анализу, необходимо уточнить суть основного в этой теме понятия. Что же обычно подразумевается под определением информационной безопасности? Это такая совокупность мер, в том числе организационных и технических, которые принимаются с целью обеспечения ряда необходимых требований: защиты, целостности, доступности и управляемости массивов информации. Правильная и надежная защита данных укрепляет суверенитет, обороноспособность, положение государства в мире, обеспечивает надежную поддержку сохранения государственной тайны [1].

Одна из самых острых проблем современного общества – ведение информационных войн. Главным оружием и одновременно преимуществом в таких войнах, конечно же, является владение информацией. Каждый из нас слышал выражение «кто владеет информацией, тот владеет миром». Оно особенно актуально в наши дни, когда каждое государство стремится завоевать главенствующую позицию на данном поприще.

По этим причинам защита данных в современном мире становится необходимостью. Требуется создание особого аппарата и разработка в этой сфере собственной инфраструктуры. Различные государства в этом плане развиты неравномерно, они используют значительно отличающиеся друг от друга подходы и методы решения задач. Некоторые страны начали формирование такого аппарата намного раньше относительно других, поэтому логично предположить, что они имеют более развитую систему.

Но даже та защита информации, которую может обеспечить государство, не является абсолютно надежной, она требует постоянного совершенствования. На протяжении 2018 года в России на муниципальные и частные компьютерные ресурсы только за период проведения Чемпионата мира по футболу было совершено примерно 25 млн кибернападений. Это число не является пределом, во всем мире оно возрастает с каждым годом. По данным Лаборатории Касперского, Россия занимает первое место в мире по количеству кибератак [2].

В рамках статьи рассматриваются страны, которые смогли зарекомендовать себя как информационные державы. Сравнивается степень развития РФ с другими странами.

Материалы и методы

Основным документом, обеспечивающим регулировку защиты информации в масштабах всего государства, выступает Доктрина информационной безопасности. В 2016 году она была существенно переработана из-за значительно устаревшего содержания документа, вступившего в силу шестнадцать лет назад.

В общих положениях доктрины говорится об являющихся наиболее значимыми угрозах для информационной безопасности РФ, взглядах на обеспечение национальной безопасности. Особый упор делается на важность продолжения развития информационных технологий [3].

Также имеет место ряд соответствующих законов: Конституция РФ; Федеральный закон о персональных данных (ред. от 31.12.2017); Конвенция о защите физических лиц; Закон о государственной тайне (ред. от 29.07.2018); Федеральный закон о коммерческой тайне (ред. от 18.04.2018) [4].

Как можно видеть по вышеприведенному списку, регулированию обеспечения информационной защиты и охране персональных данных отводится немалая роль.

Помимо этого, можно назвать ряд государственных организаций, которые реализуют надзор за деятельностью в сфере защиты информации: ФСТЭК России, ФСБ РФ, МВД РФ, Росвязьохранкультура, Межведомственная комиссия по защите государственной тайны [5].

Россия потребность в защите данных на уровне государства осознала лишь в 1990-2000 годах, в то время как в Соединенных Штатах Америки еще в 1906 году был принят самый первый в своем роде закон об охране информации. В наши дни, спустя более чем через столетие длительного формирования в данной сфере, в США насчитывается уже приблизительно пятьсот различных законодательных актов, имеющих непосредственное отношение к данной области. РФ же, в свою очередь, очевидно, не обладает подобным разнообразием законов об информационной безопасности [6].

Проблемы, вызывающие повышенное внимание служб охраны информации, в США решаются под руководством Агентства национальной безопасности (АНБ) и Совета национальной безопасности.

Уже упоминалось ранее, что формирование законодательства США в области информационной безопасности исторически началось намного раньше. Так, например, некоторые законы были зафиксированы законодательством еще до начала двухтысячного года:

- "О свободе информации" (1967 год);
- "О секретности" (1974 год);
- "О праве на финансовую секретность" (1978 год) [7].

Сравнивая нормативную основу Российской Федерации и США, не лишним будет отметить, что в России она носит скорее оборонительный характер, имеет

курс на сохранение суверенитета, государственной тайны, укрепление обороны страны [8].

Государством с одной из наиболее развитых в мире информационной инфраструктурой является также Великобритания. Ее власти осознали всю важность разработки законодательства в области обеспечения защиты данных значительно раньше других стран Европы. В стране на данный момент действует самая строгая концепция организации защиты информации.

Основополагающим законодательным актом Великобритании, призванным обеспечить государственную безопасность, считается Стратегия национальной безопасности (2010г.). Согласно ей, безопасность информации и анти-террористические мероприятия становятся приоритетными направлениями.

Закон «The Official Secret Act» 1911 года составляет фундамент защиты государственной тайны Британии. Он претерпел поправки и дополнения 1920, 1939, 1989 гг. Также ее регулируют законы:

- «О государственных архивах» (1958 г.);
- «О нарушении конфиденциальности» (1981 г.);
- «О следственных органах» (1985 г.);
- «О службе безопасности» (1989 г.).

Любая организация Великобритании должна самостоятельно заботиться об охране собственных коммерческих тайн, в связи с чем для крупных компаний формируются собственные службы безопасности.

Государственная организация по обеспечению безопасности страны строится, отталкиваясь от определения информационной войны, как операций, которые способны нанести значительный ущерб информационной системе противника, защищая вместе с тем собственные системы, что вполне можно назвать оптимальной тактикой.

Германию без сомнения можно назвать бесспорным лидером среди Европейских стран в области регулирования защиты личной информации, ее представления на законодательном уровне. Первый законодательный акт этого государства «О защите персональных данных» был принят в 1970 году. Федеральный закон был пересмотрен в 1990 году во взаимосвязи с быстрыми темпами развития СМИ и телекоммуникационных технологий. Были внесены соответствующие дополнения и правки в статью 41 и статью 42.

Федеральная служба безопасности информационной техники, основанная в 1991 году, несет ответственность за обеспечение безопасности каналов информации Германии. С этой целью и создавалась специальная Федеральная комиссия в сфере охраны личных данных. В лице Федеральных уполномоченных она осуществляет контроль исполнения закона на высшем федеральном уровне.

Немецкое понимание информационной войны следующее: наступающая и защитная составляющие объединяются в единое целое, причем иностранные государства отделяются от негосудар-

ственных организаций, рассматриваясь отдельно.

Вопросами информационной безопасности Франции занимаются не только государственные структуры. В данном процессе участвуют также негосударственные организации. Любое французское полицейское управление имеет собственный особый отдел по борьбе с информационными правонарушениями в каждом регионе.

Термин «государственная тайна» во Франции заменен определением «тайна национальной обороны». Характером тайны национальной обороны обладают документы, сведения, технологии и т.п., имеющие непосредственное отношение к национальной обороне (в соответствии со ст. 413-9).

За все кибератаки и несанкционированные посягательства на данные, соответственно, несет уголовная либо административная ответственность в зависимости от тяжести правонарушения. В качестве санкций для физических лиц предусмотрено заключение в тюрьму длительностью от 1 года до 3 лет и штраф в размере от 100 000 франков (6 631 990 рублей) до 300 000 франков (19 895 970 рублей) [9].

Также в наиболее важные системы активно внедряется криптографическое программное обеспечение. Это связано с мнением французских экспертов о том, что с помощью методов шифрации достигается наилучшее обеспечение защищенности информации в сетях.

Под руководством Министерства обороны Франции функционируют три службы по информационной защите: Генеральная дирекция внешней безопасности (1982г.), Управление военной разведки (1992г.) и Управление военной контрразведки (1981г.). Общий состав разведсообщества Франции является приблизительно равным 12779 сотрудников.

Следовательно, задачу информационной безопасности на сегодняшний день невозможно охарактеризовать как узконаправленную, она постепенно, но все больше перетекает в область международных проблем. Хотя в обеспечении международной информационной безопасности по-прежнему присутствует одна из основных трудностей: она не является объектом регулирования международного права [10].

Однако в сфере стандартизации мер и систем безопасности подобные нормы существуют и активно используются. Это эталоны производственного и торгового оборота, которые относятся к системе под названием ISO/IEC 27000. В данном случае двойная аббревиатура ISO/IEC показывает, что стандарты разработаны Международной комиссией по стандартизации (ISO), которая своими нормативными актами определяет качество процессов производства, и Международной Энергетической комиссией (IEC).

ISO/IEC 27000 включают в себя ряд рекомендаций и практических советов с целью внедрения концепции менедж-

мента информационной безопасности (СМИБ) [11].

Предложенный метод предполагает проведение анализа уязвимостей в области информационной безопасности и повышения доли предотвращенных атак на информационные ресурсы в процентном выражении, а также сравнение законодательств развитых стран-лидеров в этой сфере, разработку на их базе адаптированных нормативно-правовых актов и внедрение в отечественное законодательство. Алгоритм представлен на рис. 1.

В ходе выполнения данного алгоритма был сделан вывод, что для усовершенствования функционирования данной системы и улучшения результатов ее работы следует предпринять следующие действия:

- расширение границ сотрудничества РФ в сфере развития и формирования защиты информации на международной арене, а также сопротивление противоборству и его возможному развязыванию в данной сфере;

- осуществление борьбы с правонарушениями в сфере информационной безопасности с помощью фиксирования в соответствующих статьях Уголовного кодекса РФ, доработка уже существующих статей 280 и 282 УК РФ;

- более четкое определение таких видов информации, как персональные данные, семейная тайна и тайна личной жизни, государственная тайна, коммерческая тайна, а также улучшение гарантии их безопасности.

Необходимым также можно назвать организацию по расширению производства в нашей стране таких ключевых элементов, как системы и средства информатизации, а также стремление России зафиксироваться в международной кооперации их производителей. Это довольно важный факт, ведь без современных компьютерных и телекоммуникационных систем и их постоянного усовершенствования невозможно полное и надежное обеспечение защиты информационных данных [12].

Результаты и их обсуждение

Для проверки предложенных в качестве улучшения методов были произведены расчеты с помощью метода анализа иерархий (МАИ). В ходе сравнения для определения важности критериев используется девятибалльная шкала. Определенным критериям ставятся в соответствие веса в зависимости от значимости, затем расставляются баллы, отражающие влияние предложенных методов на критерии.

С помощью метода Саати рассчитываются коэффициенты важности для критериев, представленных в столбцах, а затем вычисляется интегральный показатель Q , который отражает улучшение показателей в процентах.

На основе полученных в ходе вычислений результатов строится наиболее наглядно представляющая информацию диаграмма, отражающая значение интегрального показателя для всех указанных критериев [13].

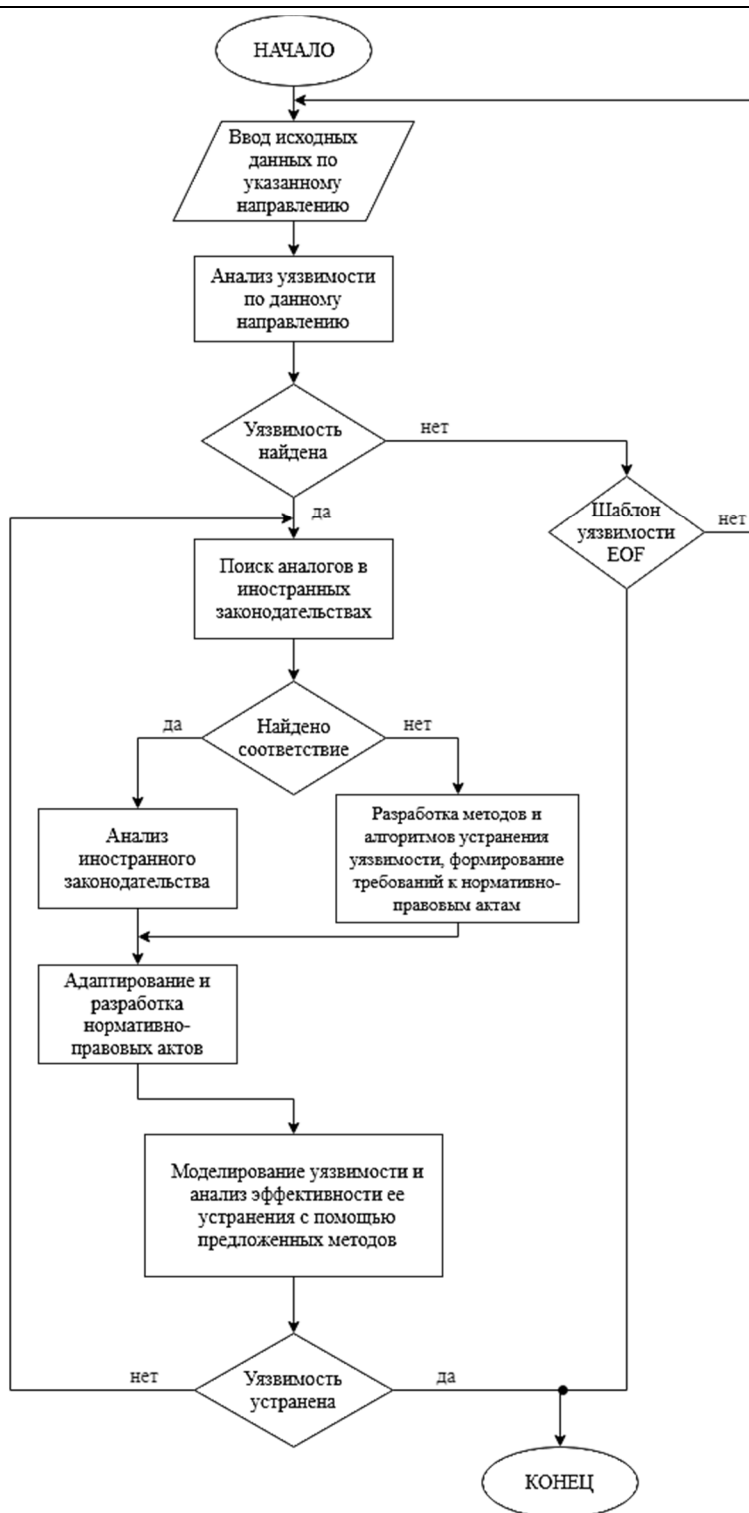


Рис. 1. Алгоритм устранения уязвимостей в информационной безопасности Российской Федерации

Fig. 1. Algorithm of elimination of vulnerabilities in information security of the Russian Federation

Ниже представлены результаты моделирования, воспроизведенные с по-

мощью метода иерархий Саати (табл., рис. 2).

Расчет интегральных показателей

Calculation of integral indicators

Критерии		Веса	Расширение границ сотрудничества в данной сфере	Развитие в РФ производства средств и систем информатизации	Борьба с информационными преступлениями	Улучшение законодательства в данной сфере	Персональные данные, государственная и коммерческая тайна	Базовые значения
Конфиденциальность	A ₁	1,00	3	5	7	6	7	5,60
Целостность	A ₂	0,90	4	4	6	5	6	5,00
Доступность	A ₃	0,80	6	5	4	5	3	4,60
Аутентичность	A ₄	0,50	5	2	6	6	4	4,60
Апеллируемость	A ₅	0,50	5	2	5	6	4	4,40
Интегральный показатель Q, (%)			16,40	14,60	21,10	20,50	18,80	

Диаграмма интегрального показателя качества для каждого
усовершенствования

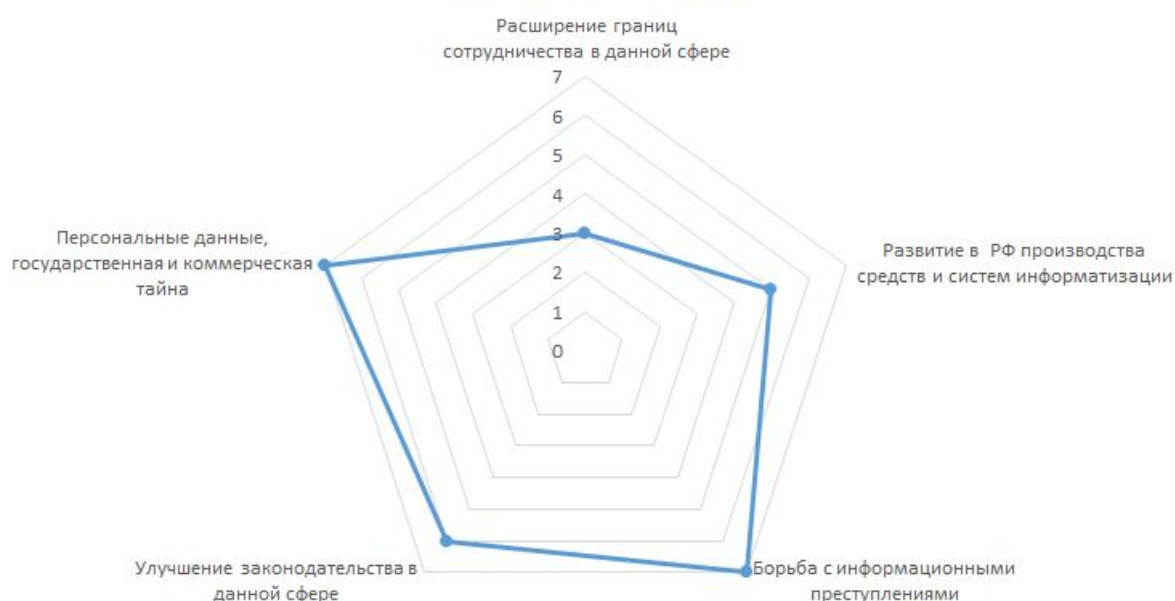


Рис. 2. Результат расчетов, представленный в виде диаграммы

Fig. 2. The result of the calculations is presented in the form of a diagram

Выводы

В качестве подведения итогов проведенного анализа можно сказать следующее: информационной безопасно-

сти в России уделяется значительное внимание, для ее обеспечения проведены многие меры, принят целый ряд законодательных актов, действуют специ-

альные федеральные органы. Однако имеются и существенные недостатки. По-прежнему несовершенно обеспечение защиты персональных данных, требуют серьезной доработки статьи 280 и 282 УК РФ, устанавливающие уголовную ответственность за высказывания в социальных сетях. Сравнивая уровень развития данной сферы с другими странами, можно сказать, что оно, в целом,

началось в них гораздо раньше и, следовательно, имеет более установившуюся базу. Многие методы и концепции защиты данных, принятые в перечисленных странах, являются более результативными. У России есть перспективы развития в направлении защиты информации, поэтому следует улучшать ее законодательную, организационную и технологическую основу.

Список источников

1. Панищев В.С., Таныгин М.О., Информационная безопасность. Курск, 2017. 196 с.
2. Карта киберугроз в режиме реального времени. URL: [https:// cybermap.kaspersky.com/ru/](https://cybermap.kaspersky.com/ru/) (дата обращения 22.11.2018).
3. «Консультант Плюс» - законодательство РФ: кодексы, законы, указы, постановления правительства РФ. URL: [http:// www.consultant.ru/](http://www.consultant.ru/) (дата обращения 23.11.2018).
4. Евсеева А.А., Калущий И.В., Спеваков А.Г. Сравнительный анализ российского и китайского законодательства в области обработки и защиты персональных данных// Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. №7. С.78-84.
5. Система защиты информации в ведущих зарубежных странах. URL: [http://webkonspect.com/?room= profile&id=11572&labelid= 162322](http://webkonspect.com/?room=profile&id=11572&labelid=162322). (дата обращения 23.11.2018).
6. Попыкин А.В. Информационная безопасность России в системе многополярного сотрудничества // Актуальные проблемы международных отношений в условиях формирования мультиполярного мира. Курск, 2015. С.129-131.
7. Аверченков В. И. Системы защиты информации в ведущих зарубежных странах. Брянск, 2007. 225 с.
8. Остроцкая С.В., Калущий И.В. Модель интерактивного справочного ресурса сведений и рекомендаций в области безопасности субъектов персональных данных// Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. №2. С.73-81.
9. Общие сведения о стандартах серии ISO 27000. URL: <http://www.iso27000.ru/standarty/iso-27000-mezhdunarodnye-standarty-upravleniya-informacionnoi-bezopasnostyu-1/iso-27000-mezhdunarodnye-standarty-upravleniya-informacionnoi-bezopasnostyu> (дата обращения 24.11.2018).

10. Добрица В.П., Спевачов А.Г., Губорев А.А. Алгоритм исключяющего преобразования данных // Известия Курского государственного технического университета. 2010. №1 (30). С. 49-54.

11. Graham J. Cyber Security Essentials. 2010. 331 p.

References

1. Panishev V.S., Tanygin M.O. Informacionnaya bezopanost' [Information security]: Kursk, 2017, 196 p. (In Russ.).

2. Karta kiberugroz v regime realnogo vremeni [Real-time cyber threat map] (In Russ.). Available at: <https://cybermap.kaspersky.com/ru>. (accessed: 22.11.2018).

3. "Konsultant Plus" - zakonodatelstvo RF: kodeksy, zakony, ukazy, postanovleniya pravitelstva RF ["Consultant Plus" - the legislation of the Russian Federation: codes, laws, decrees, decrees of the government of the Russian Federation]. (In Russ.) Available at: <http://www.consultant.ru/>. (accessed: 23.11.2018).

4. Evseeva A.A., Kaluckiy I.V., Spevakov A.G. Sravnitelniy analiz rossiiskogo i kitaiskogo zakonodatelstva v oblasti obrabotki i zashity personalnyh dannyh [Comparative analysis of Russian and Chinese legislation in the field of processing and protection of personal data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no.7, pp.78-84 (In Russ.).

5. Systema zashity informacij v vedushih zarubegnih stranah [Information security system in leading foreign countries]. Available at: <http://webkonspekt.com/?room=profile&id=11572&labelid=162322>. (accessed: 23.11.2018).

6. Popykin A.V. Informatsionnaya bezopasnost' Rossij v sisteme mnogopolyarnogo sotrudnichestva [Information security of Russia in the system of multipolar cooperation]. *Aktualnye problem megdunarodnyh otnosheniy v usloviyah formirovaniya multipolyarnogo mira = Actual problems of international relations in the context of the formation of a multipolar world*. Kursk, 2015, pp.129-131 (In Russ.).

7. Averchenkov V.I. Sistemy zashity informatsij v vedushih zarubegnih stranah [Information security systems in leading foreign countries]. Bryansk, 2007, 225 p. (In Russ.).

8. Ostrockaya S.V., Kaluckiy I.V. Model' interaktivnogo spravochного resursa svedeniy i rekomendacij v oblasti bezopasnosti subjektov personalnyh dannyh [A model of an interactive reference resource of information and recommendations in the field of security of personal data subjects]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, no.2, pp.73-81 (In Russ.).

9. Obshkiye svedeniya o standartah serij ISO 27000 [General information on the standards of the ISO 27000 series] (In Russ.). Available at: <http://www.iso27000.ru/standarty/iso->

27000-mezhdunarodnye-standarty-upravleniya-informacionnoi-bezopasnostyu-1/iso-27000-

mezhdunarodnye-standarty-upravleniya-informacionnoi-bezopasnostyu. (accessed 24.11.2018).

10. Dobritsa V.P., Spevakov A.G., Guborev A.A. Algoritm iskluchaushego preobrazovaniya dannyh [Exclusion data conversion algorithm]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2010, no.1 (30), pp. 49-54 (In Russ.).

11. Graham J. Cyber Security Essentials. 2010, 331 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ханис Андрей Леонидович, кандидат военных наук, доцент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: hanis.a_@mail.ru

Andrey L. Hanis, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Information Security Department, Kursk, Russian Federation, e-mail: hanis.a_@mail.ru

Щедрина Екатерина Игоревна, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: cat.shhedrina05061999@yandex.ru

Yekaterina I. Shhedrina, student, Kursk, Russian Federation, e-mail: cat.shhedrina05061999@yandex.ru

Спевакова Светлана Викторовна, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sspev@yandex.ru

Svetlana V. Spevakova, Post-Graduate Student, Computer Engineering Department, Kursk, Russian Federation, e-mail: sspev@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>

Применение теории управления для описания системы управления региональной социально-экономической системой

Е.Э. Аверченкова¹ ✉, А.Н. Горбунов¹

¹ ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет", бул. 50-летия Октября, 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Цель исследования: Данная работа представляет собой формализацию системы управления региональной социально-экономической системой на основе принципов и понятий теории управления.

Методы. Показано, что описание элементов и причинно-следственных связей в системе управления региональной социально-экономической системой на основе принципов и понятий теории управления поддается четкой формализации. При таком подходе обеспечивается решение задачи регионального государственного управления с точки зрения учета влияния возмущений внешней среды. В качестве задающего воздействия выступают Национальные проекты РФ, которые через управляющее устройство формируют управляющее воздействие на региональную социально-экономическую систему. Система обратной отрицательной связи позволяет скорректировать изменение выходных координат объекта управления в соответствии с целевыми установками Национальных проектов. Внешняя среда рассматривается в системе как «мешающая» запланированной траектории развития региональной социально-экономической системе, продуцируя основные возмущения и помехи. Сформулирована целевая задача системы управления с позиций теории управления: максимально сократить разрыв между желаемой траекторией развития региона, определяемой Национальными проектами, и его реальными трендами.

Результаты. Представлены структура и функциональные компоненты системы управления региональной социально-экономической системой. Основными элементами являются: внешняя среда, объект управления (региональная социально-экономическая система), устройство управления (система поддержки принятия решений «ДАТА»), исполнительное устройство (абстрактный госслужащий), три измерительных устройства и три контролирующих устройства. Представлены принципы управления разработанной системы. Приведены классификационные признаки разработанной системы управления региональной социально-экономической системы как сложной системы (декомпозиция, децентрализация, иерархическое управление и многорежимное управление), а также решаемые иерархические задачи (стратегического, тактического и локального уровня).

Заключение. Применение теории управления для формализации прикладных процессов, происходящих в региональных социально-экономических системах, позволяет прописать внутренние взаимосвязи. Это позволяет описать математические модели объекта управления и внешней среды, а также использовать СППР «ДАТА» в повседневной практике регионального управления.

Ключевые слова: теория управления; региональная социально-экономическая система; Национальные проекты.

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

Для цитирования: 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): 105-115. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>.

Статья поступила в редакцию 28.06.2019

Статья подписана в печать 17.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>

Application of Control Theory to Describe the Management of the Regional Socio-Economic System

Elena E. Averchenkova¹ ✉, Aleksandr N. Gorbunov¹

¹ Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya bul., Bryansk, 241035, Russian Federation

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The paper attempts to formalize the management of the regional socio-economic system based on the principles and concepts of control theory.

Methods. The article shows that the description of elements and cause-and-effect relations in the management of the regional socio-economic system on the basis of the principles and concepts of control theory lends itself to a clear formalization. This approach provides a solution to the problem of regional public administration in terms of taking into account the impact of external disturbances. National projects of the Russian Federation, which through the control device form the control influence on the regional socio-economic system, act as a regulating influence. The negative feedback system allows to adjust the changes in the output coordinates of the control object in accordance with the targets of National projects. The external environment is considered as "interfering" in the system with the planned trajectory of the regional socio-economic system development, producing the main disturbances and interferences. The objective task of the management system from the standpoint of control theory is formulated: to minimize the gap between the desired trajectory of development of the region, determined by National projects, and its real trends.

Results. The structure and functional components of the regional socio-economic management system are presented. The main elements are: the external environment, the control object (regional socio-economic system), the control device (decision support system "DATA"), the execution device (abstract civil servant), three measuring devices and three controlling devices. The principles of management of the developed system are presented. Classification features of the developed management of the regional socio-economic system as a complex system (decomposition, decentralization, hierarchical management and multi-mode management), as well as hierarchical problems being solved (at strategic, tactical and local levels) are given.

Conclusion. The application of control theory to formalize applied processes occurring in regional socio-economic systems allows us to prescribe internal relationships. It makes it possible to describe mathematical models of control object and external environment, and also to use DSS "DATA" in daily practice of regional management.

Key words: control theory; regional socio-economic system; National projects.

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

For citation: Averchenkova E. E., Gorbunov A. N. 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, 23(4): 105-115 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>.

Received 28.06.2019

Accepted 17.07.2019

Введение

Использование теории управления для описания процессов, происходящих в различных социально-экономических системах, возможно в рамках применения общих подходов теории управления организационными системами. Развитие кибернетики, исследования операций, теории автоматического регулирования, а также интенсивное внедрение их результатов при создании новых и модернизации существующих технических систем привело к интеграции этих подходов и созданию в дальнейшем теории управления организационными системами [1,2].

Разработчиками теории управления организационными системами являются передовые отечественные ученые Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. В работах Буркова В.Н., Лернера А.Я. были заложены основы теории активных систем, сформированы принципы управления активными системами. Гермейером Ю.Б. проводились исследования по созданию информационной теории иерархических систем на основе теории игр с непротивоположными интересами. В современный период в развитие теории управления организационными системами значительный вклад внес Новиков Д.А., д.т.н., проф., ныне директор Института проблем управления. Основные понятия о задачах и методах теории управления организационными системами были изложены в работе Новикова Д.А., Буркова В.Н., Коргина Н.А. «Введение в теорию управления организационными системами», а также в монографии

Новикова Д.А. «Теория управления организационными системами» [1,2].

Результаты теоретического исследования моделей и методов управления организационными системами находят свое применение при решении широкого круга практических задач в самых разных областях. Однако изучение материалов публикаций Института проблем управления позволяет сделать вывод о востребованности такого направления, как изучение задач управления в прикладном аспекте, в том числе и на примере региональных социально-экономических систем [3-5].

Рассмотрение региональной социально-экономической системы с позиции выбора альтернатив в ситуации с неопределенностью влияния внешней среды позволило предложить аппарат теории управления для формирования методов и технологий принятия управленческих решений в тех ситуациях, где ранее это осуществлялось эвристически [6-8].

Условием применения теории управления для описания системы управления региональной социально-экономической системой является наличие и возможность формализованного описания причинно-следственных связей, четко определяемых элементов (например, объекта управления, задающего воздействия, исполнительного элемента и проч.), а также логичной структуры взаимоотношений элементов системы [1]. Таким образом, целью настоящего исследования является формализация системы управления региональной социально-экономической системой на основе теории управления.

Постановка проблемы исследования

Региональная социально-экономическая система (РСЭС) как объект и субъект государственного управления может быть рассмотрена с помощью понятий и принципов теории управления. Определяется, что управленческие решения на региональном уровне часто генерируются в условиях неопределенности внешней среды [1]. Таким образом, формируются основные составляющие элементы СУ РСЭС: объект управления – РСЭС; воздействующее влияние – государственное воздействие и целевые установки Правительства РФ (сформулированные в системе Национальных проектов) и внешняя среда, которая неоднозначно влияет на РСЭС. Порождая основные возмущения и помехи, внешняя среда «мешает» запланированной траектории развития РСЭС, следовательно, возникает целевая задача СУ РСЭС – максимально сократить разрыв между желаемой траекторией развития РСЭС (определяемой Национальными проектами) и его реальными трендами.

Материалы и методы

Визуальное представление системы управления (СУ) РСЭС представлено на рис.1. Рассмотрим структуру и функциональные компоненты СУ РСЭС в контексте работ [9-11]. СУ РСЭС включает в себя: внешнюю среду; объект управления (РСЭС); устройство управления (СППР «ДАТА»); исполнительное устройство (абстрактный госслужащий); три измерительных устройства и три контролирующих устройства. С функциональной точки зрения, в данной мо-

дели использован комбинированный принцип управления, учитывающий контур отрицательной обратной связи и цепи компенсации погрешностей и возмущений внешней среды.

Задающее воздействие $\overline{g(t)}$ в разработанной СУ РСЭС представлено целевыми установками тринадцати Национальных проектов РФ, включающих в себя общей сложностью 71 подпроект. Задающее воздействие $\overline{g(t)} = (g_1, g_2, \dots, g_{13})$ поступает на управляющее устройство (СППР «ДАТА») и через систему отрицательной обратной связи корректируется ошибкой $\overline{\epsilon(t)}$.

Внешняя среда порождает внешние возмущающие воздействия различной природы. В данной работе были выделены основные возмущения $\overline{f(t)}$, существенно влияющие на объект управления (РСЭС) через управляющее устройство, и помехи (шумы) $\delta_{\omega}(t)$, имеющие статистический характер и изменяющие управляющее воздействие $\overline{u(t)}$ в допустимых границах.

Основные возмущения $\overline{f(t)}$ учитываются (компенсируются) управляющим устройством системы, представленным СППР «ДАТА».

Информация (сигнал), поступающая от внешней среды на объект управления, перенаправляется на измерительные устройства №1, 2 и 3, которые представлены в разработанной СУ:

- №1 «Экспертные оценки влияния внешней среды на РСЭС»;
- №2 «Мониторинг внешней среды»;
- №3 «Динамика показателей социально-экономического развития РСЭС».

Функционал и алгоритмы работы всех трех измерительных устройств были ранее описаны в работах [9,11]. Измерительные устройства №1, 2 и 3 рас-

положены в СУ параллельно, на каждое устройство от внешней среды поступает возмущающее воздействие $\bar{f}(t)$, а также помехи $\delta_\omega(t)$.

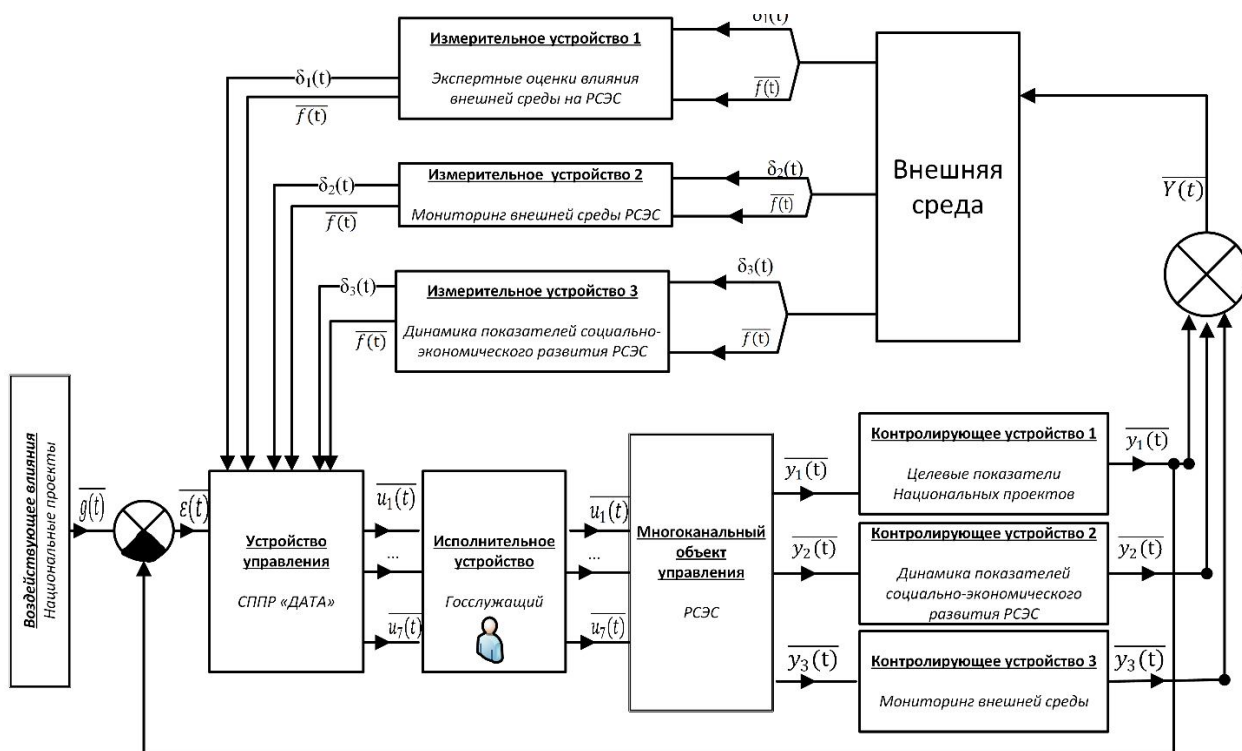


Рис.1. Модель системы управления региональной социально-экономической системой

Fig.1. The control system model of regional socio-economic system

Каждое из измерительных устройств воспринимает свой объем внешней информации и, соответственно, передает его на управляющее устройство. Управляющее устройство формирует управляющее воздействие $\bar{u}(t)$ на объект управления, РСЭС. В составе управляющего устройства в данной работе определяется только вычислительное устройство, которое реализует заданный алгоритм работы. Под вычислительным устройством предлагается понимать систему поддержки принятия решений «ДАТА» (СППР «ДАТА»), особенности функционирования, а также алгоритмы работы

которой были ранее описаны в работах [10,11]. Управляющее устройство обрабатывает полученную с помощью измерительных устройств 1, 2 и 3 текущую информацию о состоянии внешней среды.

Комбинированный принцип управления, использованный при построении СУ РСЭС, обеспечивает поступление информации на управляющее устройство от:

- внешней среды на основе принципа компенсации погрешностей и учета возмущений внешней среды;
- объекта управления за счет контура отрицательной обратной связи.

Устройство управления (СППР «ДАТА») обеспечивает формирование управляющего воздействия $\overline{u(t)}$, которое поступает на исполнительное устройство, под которым в данной работе понимается государственный служащий, принимающий управленческие решения, влияющие на РСЭС.

Определим функции управляющего устройства:

1. Анализ отклонений текущих параметров объекта управления от их значений, заданных на данный момент времени.

2. Анализ возмущающих воздействий внешней среды на основе оценок, формируемых измерительными устройствами.

3. Расчет управляющих воздействий $\overline{u(t)}$ по соответствующим алгоритмам.

Исполнительное устройство в разработанной СУ РСЭС представлено абстрактным государственным служащим – руководителем низового и среднего звена – который на практике является пользователем СППР «ДАТА». В процессе принятия управленческих решений исполнитель обращается к СППР для формирования управляющих воздействий $\overline{u(t)}$, осуществляя, таким образом, развитие управляемого процесса. Т.к. в систему управления заложено исполнительное устройство, то предлагаемый вариант СУ РСЭС классифицируется как система управления непрямого регулирования.

Объектом управления в разработанной СУ является РСЭС, от которой на контролирующие устройства посту-

пают регулируемые, или выходные, переменные $y = y_\varphi(t)$, по отношению к которым формулируется основная задача управления. Выходные переменные объединяются в вектор выхода $\overline{y(t)}$.

Контролирующие устройства в разработанной СУ РСЭС представлены следующими позициями:

- №1 «Целевые показатели Национальных проектов»;

- №2 «Динамика показателей социально-экономического развития РСЭС»;

- №3 «Мониторинг внешней среды».

Отметим, что контролирующие устройства №2 и 3 являются одновременно и измерительными устройствами №2 и 3, что объясняется их дуалистичной природой, позволяющей одновременно измерять внешний поток $\overline{f(t)}$, поступающий через измерительные устройства на объект управления (РСЭС), и контролировать выходные параметры от объекта управления $\overline{y(t)}$ после оказанного на него воздействия $\overline{u(t)}$.

Векторы выходных координат $y_\varphi(t)$ 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 влияния.

Результаты и их обсуждение

Принцип действия системы управления РСЭС

Опишем принцип действия разработанной СУ РСЭС. Во-первых, в предлагаемом варианте СУ РСЭС принцип управления по отклонению (принцип обратной связи) реализуется только для

выходного потока $\overline{y_1(t)}$. Контролирующее устройство №1 «Целевые показатели Национальных проектов» отслеживает изменение значений $\overline{y_1(t)}$ от целевых установок задающего воздействия $\overline{g(t)}$ по следующему механизму. Пусть при увеличении/уменьшении возмущений $\overline{f(t)}$, порождаемых внешней средой, выходные координаты вектора объекта управления $\overline{y_1(t)}$ начнут отклоняться от ранее заданного целевого уровня задающих воздействий $\overline{g(t)}$, это приведет к возрастанию ошибки $\overline{\varepsilon(t)}$. Соответственно, механизмы разработанной СУ РСЭС приведут вектор управляющего воздействия $\overline{u(t)}$ и объект управления (РСЭС) снова к заданному состоянию, т.е. произойдет выравнивание значений вектора выходных переменных $\overline{y_1(t)}$ до прежних значений. Ошибка системы представляет собой разность между задающим воздействием $\overline{g(t)}$ и выходными переменными $\overline{y(t)}$:

$$\overline{\varepsilon(t)} = \overline{g(t)} - \overline{y_1(t)}; \overline{\varepsilon(t)} \rightarrow 0.$$

Во-вторых, такой принцип построения систем, как регулирование по возмущению реализован в предложенном варианте СУ РСЭС таким образом, что возмущения, действующие на объект управления (РСЭС), заранее измеряются тремя измерительными устройствами и подаются на вход управляющего устройства, которое вырабатывает сигнал управления $\overline{u(t)}$ уже с учетом действующего на объект управления (РСЭС) вектора возмущения внешней среды $\overline{f(t)}$.

Принцип действия разработанной СУ РСЭС можно описать графически.

Представим график изменений выходного вектора $\overline{Y(t)}$ для предлагаемой СУ РСЭС с учетом фактора времени t . На графике (рис. 2) реальная траектория выходного вектора $\overline{Y(t)}$ не совпадает с желаемой траекторией развития СУ РСЭС, $\overline{Y^*(t)}$. График ошибки $\overline{\varepsilon(t)}$ реальной траектории (ситуация рассогласования) показывает, насколько серьезно отклонение $\overline{Y(t)}$ от желаемого тренда $\overline{Y^*(t)}$.

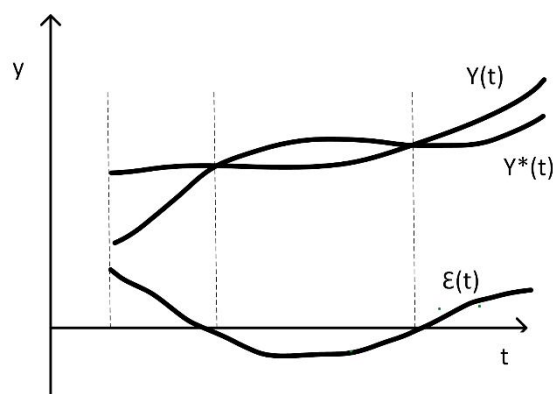


Рис. 2. Понятие реальной и желаемой траектории развития объекта управления, РСЭС

Fig. 2. The real and desired development trend of the control object - the regional socio-economic system

Ошибка $\overline{\varepsilon(t)} = \overline{Y^*(t)} - \overline{Y(t)}$ определяет значение отклонения (рассогласования) выходной переменной от задающего воздействия. Основная задача слежения в предлагаемой СУ РСЭС может быть определена как задача поддержания нулевого значения рассогласования, т.е. $\overline{\varepsilon(t)} \rightarrow 0$. Однако полностью устранить рассогласование $\overline{\varepsilon(t)}$ в предлагаемой СУ РСЭС невозможно в силу влияния на систему в реальной среде возмущающих воздействий $\overline{f(t)}$ и ограничения точности измерительных

устройств, а также погрешности работы самой СУ РСЭС.

Локальное многоканальное управление предлагаемой СУ РСЭС предполагает решение задачи слежения, т.е. задачи соблюдения заданного закона $\overline{Y^*(t)}$ изменения переменной $y(t)$: $\overline{Y(t)} \rightarrow \overline{Y^*(t)}, t \rightarrow \infty$. Для предлагаемой СУ РСЭС определим, что задача слежения будет задачей программного управления. В этой задаче программа движения $\overline{Y^*(t)}$ генерируется специальной программой – СППР «ДАТА». В то же время, СППР «ДАТА» на основании комплексного анализа внешней среды формирует продукционную систему правил – вектор выходных координат $\overline{Y(t)} \rightarrow \overline{Y^*(t)}$. Таким образом, предлагаемая СУ РСЭС может быть определена как следящая система, в которой сигнал $\overline{Y^*(t)}$, определяющий требуемый закон развития объекта управления, РСЭС, формируется задающим воздействием $\overline{g(t)}$.

Классификационные признаки
СУ РСЭС, решаемые
ею иерархические задачи

В работе реализованы следующие принципы управления разработанной СУ РСЭС как сложной системы:

- декомпозиция – расщепление сложного объекта на более простые компоненты (в работе представлена двухуровневая классификация составляющих элементов РСЭС и трехуровневая классификация факторов влияния внешней среды на РСЭС), что позволило создать комплексную и детальную картину влияния внешней среды на РСЭС;

- децентрализация – выделение устройства управления, представленного СППР «ДАТА», обеспечивающего решение отдельных подзадач управления как всем объектом управления (РСЭС) сразу, так и его составными элементами;

- иерархическое управление – введение определенной подчиненности подзадач разного уровня сложности в управляющем устройстве (СППР «ДАТА»);

- многорежимное управление (временная декомпозиция) – последовательное переключение решаемых задач в управляющем устройстве (СППР «ДАТА»).

Разработанная СУ РСЭС является сложной системой, т.к. имеет в своем составе большое количество взаимодействующих систем и обеспечивает решение сложных комплексных задач. Классифицировать разработанную СУ РСЭС как сложную можно на основе следующих признаков:

- комплексный характер управляемого объекта (РСЭС), который состоит из двухуровневых иерархий составляющих РСЭС;

- необходимость последовательного решения задачи управления РСЭС;

- иерархическая структура задач управления РСЭС, представленной трехуровневым подходом, определяющим стратегические, тактические и локальные ориентиры в рамках как задающего воздействия $\overline{g(t)}$, так и выходных координат системы $\overline{y(t)}$.

Структурированность задач СУ РСЭС определяется возможностью разбиения

СУ на компоненты меньшей сложности. Таким образом, можно говорить о структурированности решаемых разработкой СУ задач:

- стратегического уровня (обеспечение целевого уровня развития РСЭС в целом в рамках поставленных Национальными проектами ориентиров);
- тактического уровня (достижение целевого уровня по группам составляющих РСЭС);
- локального уровня (достижение конкретных целевых показателей по каждой из составляющих РСЭС).

Выводы

Применение теории управления для построения СУ РСЭС позволило по-новому взглянуть на проблему регионального управления. Так, в предложенной модели РСЭС рассматривается как объект управления, на который поступает управляющее воздействие от СППР «ДАТА», которая в свою очередь является приемником для сигналов внешней среды. В рассматриваемой мо-

дели СУ РСЭС заложен комбинированный принцип управления: с одной стороны, возмущающее воздействие внешней среды учитывается управляющим устройством через систему измерительных устройств, а с другой стороны, принцип отрицательной обратной связи позволяет учитывать рассогласование, возникающее между желаемой траекторией развития РСЭС и ее реальным трендом.

Такой подход позволяет обеспечить управляемое и динамичное развитие РСЭС, реализуя воздействующее влияние Национальных проектов. Формирование модели СУ РСЭС на основе принципов теории управления позволяет эффективно решать задачи регионального управления, в том числе на основе таких показателей качества управления, как оценки быстродействия, а также группы точностных показателей, определяющих погрешность СУ РСЭС в устоявшемся режиме по окончании переходного процесса.

Список литературы

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 3-е изд. М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. 604 с.
2. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: учебник / под ред. Д.А. Новикова. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 264 с.
3. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2001. 124 с.
4. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. 190 с.
5. Губко М.В. Математические модели оптимизации иерархических структур. М.: Ленанд, 2006. 120 с.
6. Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В. Модели и методы управления портфелями проектов. М.: ПМСОФТ, 2005. 510 с.

7. Мишин С.П. Оптимальные иерархии управления в социально-экономических системах. М.: ПМСОФТ, 2004. 230 с.
8. Новиков Д.А. Институциональное управление организационными системами. М.: ИПУ, 2003.
9. Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э., Гончаров Д.И. О необходимости принятия управленческих решений на основе моделирования социально-экономического развития региона в информационной советующей системе // Вестник БГТУ. 2018. № 4(65). С. 76-81.
10. Аверченкова Е.Э. Процесс принятия управленческого решения на региональном уровне на основе использования информационной советующей системы // Вестник БГТУ. 2016. №5(53). С. 43-49.
11. Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э. Разработка советующей информационной системы по формированию управленческих мероприятий для корректировки влияния внешней среды на региональную социально-экономическую систему // Известия Волгоградского государственного технического университета (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). 2016. №3(182). С.101-106.

References

1. Novikov D. A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami [Theory of management of organizational systems]. Moscow, Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury Publ., 2012, 604 p. (In Russ.).
2. 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.).
3. Burkov V. N., Zalozhnev A. Yu., Novikov D. A. Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnymi sistemami [Graph theory in managing organizational systems]. Moscow, Sinteg Publ., 2001, 124 p. (In Russ.).
4. Burkov V. N., Novikov D. A. Kak upravlyat' proektami [How to manage projects]. Moscow, Sinteg Publ., 1997, 190 p. (In Russ.).
5. Gubko M. V. Matematicheskie modeli optimizatsii ierarkhicheskikh struktur [Mathematical models of optimization of hierarchical structures]. Moscow, Lenand Publ., 2006. 120 p. (In Russ.).
6. Matveev A. A., Novikov D. A., Tsvetkov A.V. Modeli i metody upravleniya portfelyami proektov [Models and methods of project portfolio management]. Moscow, PMSOFT Publ., 2005, 510 p. (In Russ.).
7. Mishin S. P. Optimal'nye ierarkhii upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Optimal hierarchies of control in economic and social systems]. Moscow, PMSOFT Publ., 2004, 230 p. (In Russ.).

8. Novikov D. A. Institutsional'noe upravlenie organizatsionnymi sistemami [Institutional management of organizational systems]. Moscow, IPU Publ., 2003 (In Russ.).

9. Averchenkov A.V., Averchenkova E. E., Goncharov D. I. O neobkhodimosti prinyatiya upravlencheskikh reshenii na osnove modelirovaniya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona v informatsionnoi sovetuyushchei sisteme [On the need to make management decisions based on the modeling of socio-economic development of the region in the information Advisory system]. *Bulletin of BSTU = Vestnik BGTU*, 2018, no. 4(65), pp. 76-81 (In Russ.).

10. Averchenkova E. E. Protsess prinyatiya upravlencheskogo resheniya na regional'nom urovne na osnove ispol'zovaniya informatsionnoi sovetuyushchei sistemy [The Process of managerial decision-making at the regional level on the basis of the information advising system]. *Bulletin of BSTU = Vestnik BGTU*, 2016, no.5(53), pp. 43-49 (In Russ.).

11. Averchenkov A.V., Averchenkova E. E. Razrabotka sovetuyushchei informatsionnoi sistemy po formirovaniyu upravlencheskikh meropriyatii dlya korrektyrovki vliyaniya vneshnei sredy na regional'nyuyu sotsial'no-ekonomicheskuyu sistemu [Development of the advising information system for the formation of management measures to adjust the impact of the environment on the regional socio-economic system]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Seriya «Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noi tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh») = News of Volgograd state technical University (Series "Actual problems of management, computer engineering and Informatics in technical systems")*, 2016, no.3(182), pp. 101-106 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экономика, организация производства и управление», ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет", г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: lena_ki@inbox.ru

Elena E. Averchenkova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Economics, Organization of Production and Management Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: lena_ki@inbox.ru

Горбунов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение», ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет", г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: angor47@yandex.ru

Aleksandr N. Gorbunov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Informatics and Software Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: angor47@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-116-128>

Разработка алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в системах контроля движения промышленной продукции на основе анализа данных мультикодовой маркировки

А.В. Астафьев¹ ✉

¹ Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, ул. Орловская, 23, г. Муром, 602264, Российская Федерация

✉ e-mail: Alexahndr.Astafiev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Настоящая работа посвящена разработке алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в системах контроля движения промышленной продукции на основе анализа данных мультикодовой маркировки.

Методы. В настоящее время для идентификации промышленной продукции в основном используется маркировка изделий с помощью штрих-кода или радиочастотных меток. Существует огромное количество методов и алгоритмов их обнаружения, распознавания и идентификации, однако все они носят индивидуальный характер. В частности, идентифицируют изделие по одной метке, которых на нем может быть множество. Наличие большого количества меток на изделии объясняется тем, что каждый этап жизненного цикла предполагает собственные механизмы маркировки и идентификации. Так, на производстве изделие маркируется соответствующей меткой, при транспортировке оно может получить еще одну метку, связанную с программным обеспечением транспортной кампании, при реализации товаров изделие может получить еще несколько меток системы идентификации продавца и т.д. В другом случае мультикодовую маркировку (множество различных меток на одном изделии) можно использовать для повышения достоверности результатов систем идентификации и оперативности транспортировки путем отказа от операции поворота изделия маркировкой к считывателю.

Результаты. В работе предлагается организовать связь между различными маркировками одного и того же изделия с использованием методов контроля целостности и комбинаторики. Развитием этого подхода является использование методов имитационного моделирования для разработки подходов к прогнозированию и предотвращению нештатных ситуаций в ходе перемещения продукции. Проведены экспериментальные исследования для определения вероятности идентификации штрих-кода на изделии для определения минимального количества меток типа штрих-код для маркировки металлических труб (ОАО «Выксунский металлургический завод»).

Заключение. В статье проведен обзор и сравнительный анализ систем аналогов. Приведено описание алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в ходе перемещения продукции на основе имитационной модели процесса транспортировки изделий по территории ТЭСЦ-3 ОАО «Выксунский металлургический завод». Результаты имитационного моделирования показали эффективное использование предложенных методов для дальнейшей реализации и внедрения на предприятие.

Ключевые слова: мультикодовая маркировка; система контроля движения продукции; нештатная ситуация.

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

Для цитирования: Астафьев А.В. Разработка алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в системах контроля движения промышленной продукции на основе анализа данных мультикодовой маркировки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 116-128. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-116-128>.

Статья поступила в редакцию 07.06.2019

Статья подписана в печать 23.07.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-116-128>

Development of Algorithm for Abnormal Situations' Prediction and Prevention in Industrial Product Movement Control Systems Based on Multicode Marking Data Analysis

Aleksandr V. Astafiev ¹ ✉

¹ Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolay Grigoryevich Stoletov, 23, Orlovskaya str., Murom, 602264, Russian Federation

✉ e-mail: Alexaxndr.Astafiev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The work is devoted to the development of algorithm for abnormal situations' prediction and prevention in industrial product movement control systems based on multicode marking data analysis.

Methods: Nowadays product labeling using bar code or radio frequency tags is mainly used to identify products. There are a lot of methods and algorithms for their detection, recognition and identification. But they are individual. Specifically, the product is identified by a certain label. The presence of a large number of labels on the product is due to the fact that each stage of the life cycle involves its own marking and identification mechanisms. Thus, at manufacturing site, the product is marked with a label, during transportation it can obtain another label related to the transport campaign software, during sales the product can have several more labels of the seller identification system, etc. Otherwise, multicode marking (different marks on one product) can be used to improve the reliability of identification system results and the speed of transportation by not turning the product to a label reader.

Results. This paper describes how to organize connection between different markings of the same product using methods of integrity control and combinatorics. The development of this approach is the use of simulation techniques to develop approaches for predicting and preventing of emergency situations during product movements. Experimental studies were carried out to determine the probability of identifying a bar code on the product to determine the minimum number of marks like bar code for marking metal pipes (OJSC "Vyksun Metallurgical Plant").

Conclusion. The article has a review and comparative analysis of analog systems. The algorithm of abnormal situations' prediction and prevention during product movement is described. The description is done on the basis of simulation model of product transportation process in the territory of CHPP-3 of OJSC "Vyksun Metallurgical Plant". Simulation results showed efficient use of proposed methods for further implementation at enterprises.

Key words: multicode marking; system of product movement control; abnormal situation.

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

For citation: Astafiev A.V. Development of Algorithm for Abnormal Situations' Prediction and Prevention in Industrial Product Movement Control Systems Based on Multicode Marking Data Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 116-128 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-116-128>.

Received 07.06.2019

Accepted 23.07.2019

Введение

В настоящее время для идентификации промышленной продукции в основном используется маркировка изделий с помощью штрих-кода [1-3] или радиочастотных меток [4-11]. Данные решения действительно позволяют сократить время поиска того или иного изделия на территории предприятия, однако и они не лишены недостатков, так как методы идентификации, заложенные в основе подобного рода систем, не способны прогнозировать возможные нештатные ситуации [12].

Например, при перемещении груза метка не всегда находится в поле зрения сенсора, вследствие чего маркировка не видна считывающему устройству или человеку. Хотя стоит отметить, что в целях безопасности человек на таких работах практически не участвует. Также маркировка, в ходе транспортировки или передвижения по конвейерной ленте, может быть плохо закреплена, в результате она может открепиться или попасть на другое изделие. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что для достоверной идентификации продукции следует использовать несколько маркировок на одном изделии, количество которых может зависеть от гео-

метрических параметров объекта. Такой подход будем называть мультикодовой маркировкой. Для точного контроля местоположения изделий следует применять алгоритм поиска ошибок при возникновении нештатных ситуаций (например: когда на нескольких участках идентифицируется одна метка из нескольких возможных), что позволит оперативно принять решение оператору и устранить нарушение.

Цель данной работы – разработка алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в системах контроля движения промышленной продукции на основе анализа данных мультикодовой маркировки. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести сравнительный анализ систем аналогов;
- разработать имитационную модель процесса перемещения продукции;
- сформулировать нештатные ситуации;
- разработать алгоритм прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций;
- провести экспериментальное исследование с использованием средств имитационного моделирования.

Материалы и методы

Обзор аналогов

В настоящее время для осуществления организации контроля движения существуют большое количество программно-аппаратных решений. Проведем сравнительный анализ нескольких основных аналогов для выявления их достоинств и недостатков:

1. VITRONIC – система автоматического распознавания применяется для считывания штрих-кодов в различных отраслях промышленности. Результаты анализа данной системы приведены в табл. 1.

2. OptiCode – промышленный сканер для высокоскоростного считывания штрих-кодов. Достоинства и недостатки представлены в табл. 2.

Таблица 1

Достоинства и недостатки использования VITRONIC

Table 1

Advantages and disadvantages of using VITRONIC

VITRONIC	
Достоинства использования	Недостатки использования
Распознавание различных типов кодов (1D, 2D)	Требуется реализация алгоритма контроля нештатных ситуаций
Чтение OCR (серийные номера, номера партий, изделий и т.п.)	
Мультикодовое считывание	

Таблица 2

Достоинства и недостатки использования OptiCode

Table 2

Advantages and disadvantages of using OptiCode

OptiCode	
Достоинства использования	Недостатки использования
Отслеживание изделия от момента приема до склада	Требуется реализация алгоритма контроля нештатных ситуаций
Сканирование штрих-кодов с большого расстояния (15м)	
Позволяет располагать камеру на кранах или тележках	Нет поддержки мультикодового считывания

В результате сравнительного анализа представленных аналогов можно сделать вывод о том, что данные решения не совсем подходят для использования, так как в основном у них отсут-

ствует алгоритм прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций. В некоторых случаях нет поддержки мультикодового считывания, вследствие чего на доработку потребуется значительное

количество средств, что является нерентабельным.

Разработка имитационной модели перемещения промышленной продукции

Разработка алгоритмов построения систем контроля движения направлена на автоматизацию технологических процессов промышленных предприятий. Исходя из этого была разработана имитационная модель, основанная на процессе транспортировки продукции по территории ТЭСЦ-3 ОАО «Выксунский металлургический завод».

В ходе работы было сформулировано задание для построения имитационной модели. На предприятие каждые 100 ± 20 с поступают заявки на прием промышленной продукции. Далее изделия перемещаются в стеллажи для хранения. Обработка таких заявок занимает 180 ± 20 с. После изделие может пе-

реместиться в соседние стеллажи или место отгрузки. Обработка занимает 150 ± 20 с и 160 ± 40 с соответственно. Если в пункте приема количество заявок превышает пороговое значение или оставшиеся заявки не успели обработать в течение заданного промежутка времени, то они автоматически отправляются на резервный склад. Необходимо смоделировать работу перемещения промышленных изделий за время одной рабочей смены. Схема данной имитационной модели показана на рис. 1.

В ходе анализа процесса транспортировки изделий по территории ТЭСЦ-3 ОАО «Выксунский металлургический завод» и имитационной модели были выявлены следующие нештатные ситуации:

1. Нештатная ситуация 1 – в процессе перемещения изделия считывается одна и та же маркировка.

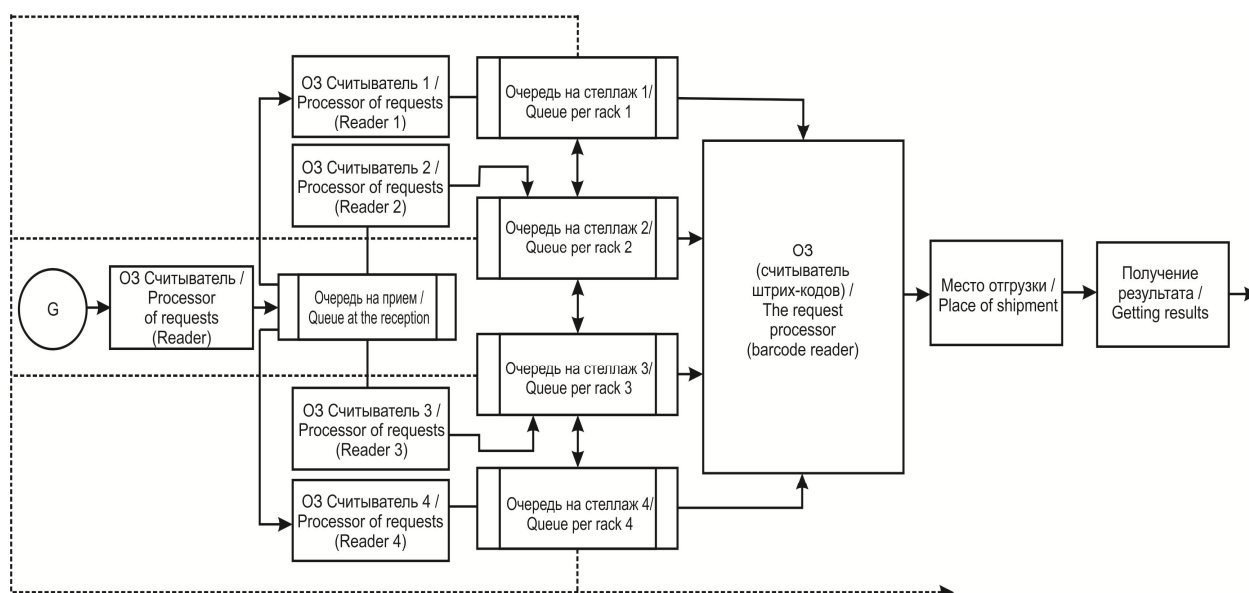


Рис. 1. Схема модели процесса транспортировки изделий

Fig. 1. Model of the product transportation process

2. Нештатная ситуация 2 – в процессе идентификации в поле зрения считывающего устройства попала несуществующая маркировка.

3. Нештатная ситуация 3 – в процессе перемещения на изделие попала маркировка другого объекта, путем механического воздействия (маркировка отклеилась) или умышленного действия персонала (преднамеренная переклейка маркировки).

Разработка алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций в ходе перемещения продукции

Для того, чтобы предотвратить или своевременно получить информацию о заявленных нештатных ситуациях предлагается использовать следующий алгоритм:

1. При поступлении изделий на место приема фиксируем идентифицированные маркировки изделия, время поступления, и его местонахождение.

2. При перемещении фиксируется время, текущее местонахождение и местоположение стеллажа, на который поступает изделие.

3. Поступление на стеллаж происходит так же, как и в пункте 1 со сравнением маркировок.

4. Перемещение между стеллажами и при поступлении на место отгрузки происходит в соответствии с пунктами 1-3.

5. Если в процессе перемещения изделия из мест хранения в поле зрения считывающего устройства попадает одинаковая маркировка, система генерирует предупреждение для ее проверки, что соответствует нештатной ситуации 1.

6. Если в поле зрения считывающего устройства попала несуществующая маркировка или она с другого изделия, генерируем предупреждение, что соответствует нештатным ситуациям 2, 3.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Результаты и их обсуждение

Описание эксперимента

Перед реализацией алгоритма и модели был проведен эксперимент для сбора всех необходимых входных данных.

Эксперимент состоял в следующем:

1. Был взят предмет цилиндрической формы, на него были нанесены 4 штрих-кода. Предметов может быть несколько, так как на реальном производстве при перемещении продукции краном или конвейерной лентой в поле считывающего сенсора одновременно попадают несколько изделий.

2. С помощью любого технического устройства, позволяющего захватить изображение (например: камера мобильного телефона или фотоаппарат), было получено несколько снимков, на которых были запечатлены изделия в разных положениях (имеется в виду разное позиционирование).

3. На основе собранных изображений была собрана статистика считанных штрих-кодов.

4. В результате собранной информации была рассчитана вероятность идентификации маркировок, что в дальнейшем позволило провести моделирование.

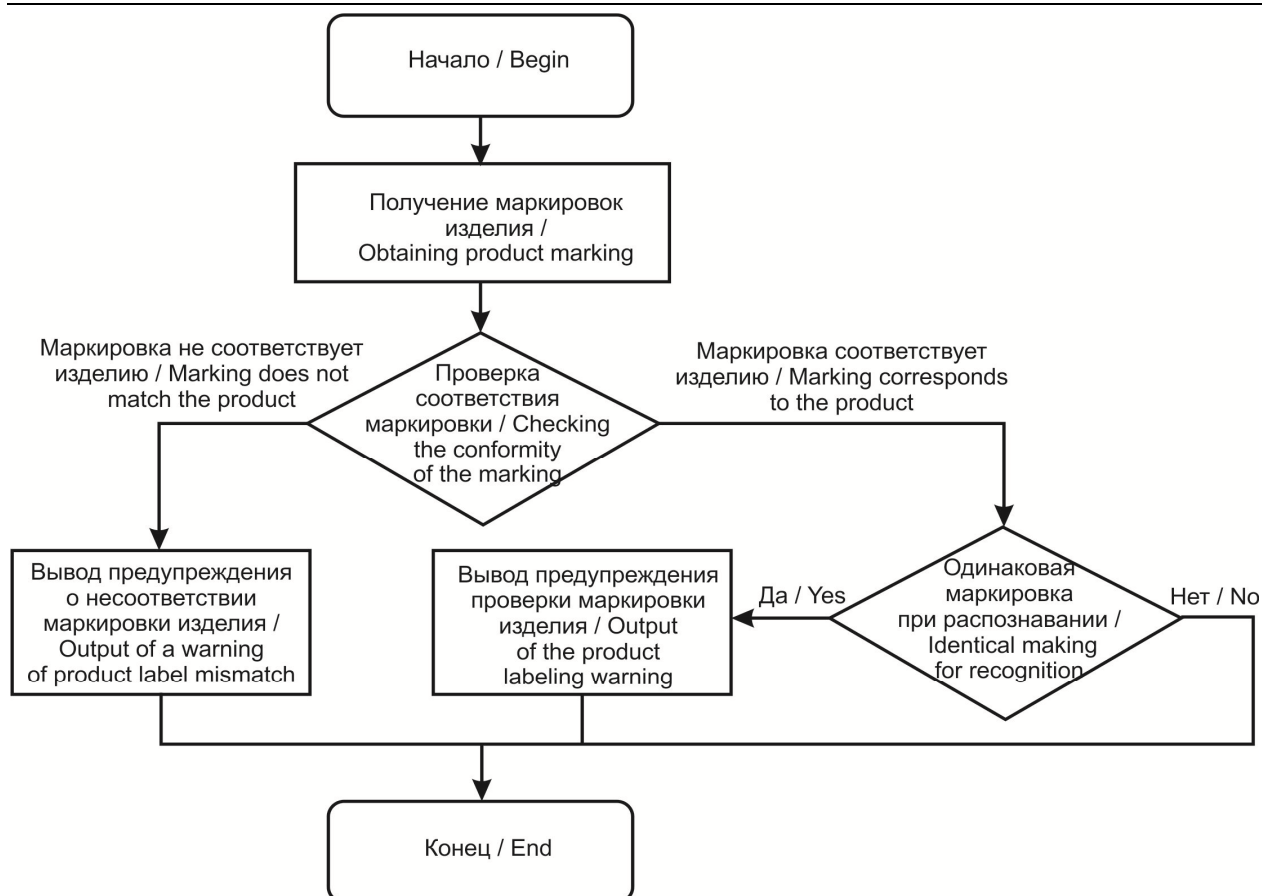


Рис. 2. Блок-схема разрабатываемого алгоритма

Fig. 2. Block diagram of the algorithm being developed

Анализ изображений

В ходе эксперимента, было взято 3 цилиндрических предмета, на каждом из которых было прикреплено 4 штрих-кода. Для мультикодовой маркировки был использован штрих-код типа Code-11, представленный на рис. 3:



Рис. 3. Пример штрих-кода, используемый для маркировки изделий

Fig. 3. Example barcode used for marking products

Для того чтобы получить более точный результат, необходимо сфотографировать как можно больше различных случаев. Результат представлен на рис. 4.

Как видно из рис. 4, при различном позиционировании объекта в большинстве случаев идентифицируются 1 или 2 штрих-кода. Стоит отметить, что на некоторых изображениях было распознано и 3 метки на одном изделии, однако такой результат возникает крайне редко и им можно пренебречь, так как метка практически не видна. По полученным изображениям была произведена выборка, результаты которой сведены в табл. 3.

По информации, представленной в табл. 3, можно узнать числовые данные о распознавании только 1 штрих-кода, 2 и более.



Рис. 4. Пример изображений, полученных в ходе съемки

Fig. 4. Example of experimental images

Таблица 3

Общее количество идентифицированных тегов

Table 3

Total number of tags identified

№ изобра- жения	Количество идентифицированных штрих-кодов												Нераспо- знанные штрих- коды
	Труба 1				Труба 2				Труба 3				
	№ штрих-кода на трубе				№ штрих-кода на трубе				№ штрих-кода на трубе				
	00000001	00000002	00000003	00000004	00000005	00000006	00000007	00000008	00000009	00000010	00000011	00000012	
1				1			1	1			1		1
2	1				1			1			1		0
3	1			1			1	1			1	1	0
4				1			1					1	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1597			1				1	1			1		1
1598			1				1				1	1	1
1599	1			1				1	1				2
1600		1					1				1		1
Всего рас- познано	680	240	280	720	80	80	760	760	720	280	400	320	1840
Итого	1920				1680				1720				1840

Таблица 4

Количество считанных меток на каждом объекте

Table 4

The number of tags read on each object

Вариант	Кол-во считанных меток (раз)		
	Труба 1	Труба 2	Труба 3
1 штрих-код распознан	920	960	1020
2 штрих-кода распознано	680	640	580
3 и более штрих-кодов распознано	0	0	0

В результате, из представленных таблиц можно вычислить вероятность идентификации штрих-кода на изделии:

1. Вероятность распознавания 1 штрих-кода: 66,67%.
2. Вероятность распознавания 2 штрих-кодов: 33,33%.

Результаты работы имитационной модели

Исходя из схемы разработанной имитационной модели, представленной

на рис. 1, видно, что каждое перемещение объекта контролируется путем считывания маркировок с помощью обработчика заявок (ОЗ) от места приема изделия до его отгрузки. В этом обработчике происходит сравнение маркировок и дальнейшее принятие решения по выводу сообщений в случае возникновения нештатной ситуации в ходе транспортировки (рис. 5, 6).

The process of moving:			
10:00:57	Product ID: 6	Moved to the rack 4	Recognized: 9880750,9880748
10:00:57	Product ID: 2	Moved to the place of shipment	Recognized: 1922516,1922517
10:00:58	Product ID: 11	Moved to the rack 3	Recognized: 9441368,9441369
10:00:58	Product ID: 6	Moved to the place of shipment	Recognized: 9880749
10:00:59	Product ID: 21	Moved to the rack 1	Recognized: 2055596
10:01:00	Product ID: 11	Moved to the place of shipment	Recognized: 9441368,9441369
10:01:00	Product ID: 22	Moved to the rack 4	Recognized: 9860738
10:01:00	Product ID: 30	Moved to the rack 4	Recognized: 9429826,9429825
10:01:01	Product ID: 35	Moved to the rack 4	Recognized: 6378369
10:01:02	Product ID: 21	Moved to the place of shipment	Recognized: 2055596
10:01:05	Product ID: 64	Moved to the rack 1	Recognized: 7303325,7303324
10:01:06	Product ID: 46	Moved to the rack 1	Recognized: 1054826
10:01:06	Product ID: 35	Moved to the place of shipment	Recognized: 6378372
10:01:06	Product ID: 30	Moved to the place of shipment	Recognized: 9429824
10:01:07	Product ID: 45	Moved to the rack 4	Recognized: 6363338,6363335
10:01:08	Product ID: 60	Moved to the rack 1	Recognized: 9979266
10:01:09	Product ID: 20	Moved to the rack 2	Recognized: 7325444,7325445

Рис. 5. Вывод отчета процесса перемещения

Fig. 5. Report Displacement Process

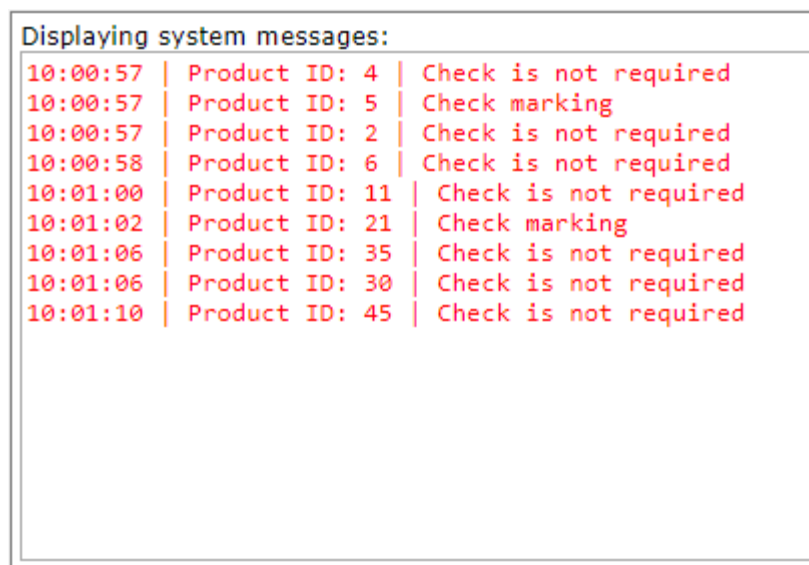


Рис. 6. Вывод системных сообщений в ходе перемещения

Fig. 6. Display system messages

На представленных рисунках видна работа алгоритма прогнозирования и предотвращения нештатных ситуаций. Например, если взять изделие под номером 4, то в процессе его перемещения можно заметить то, что по прибытию в стеллаж 1 считыватель идентифицировал только одну маркировку (номер штрих-кода: 5852835). После поступления изделия на место отгрузки наблюдается точно такая же маркировка, в результате чего происходит генерация сообщения и уведомление о возможном нарушении в маркировке изделия с целью его проверки. Пример общего отчета результата моделирования показан на рис. 7.

Выводы

На основе выполненной работы можно сделать вывод о том, что при использовании нескольких меток для идентификации продукции повышается

вероятность распознавания, так как не зависимо от позиционирования в любом случае 1 метка будет видна считывающему устройству.

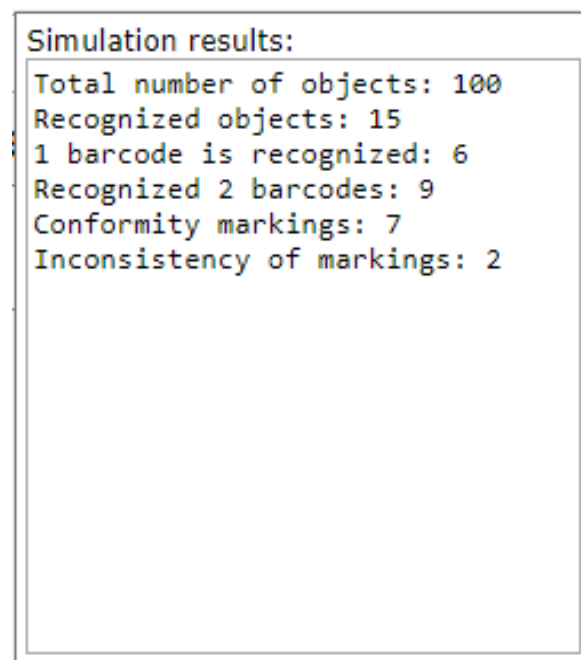


Рис. 7. Пример общего отчета о результатах моделирования

Fig. 7. Example of a general report on simulation results

Исходя из полученных входных данных, была разработана имитационная модель перемещения продукции с использованием алгоритма прогнозирования и предотвращения внештатных

ситуаций. Результаты имитационного моделирования показали эффективное использование предложенных методов для дальнейшей реализации и внедрения на предприятие.

Список литературы

1. Орлов А.А., Астафьев А.В., Привезенцев Д.Г. Разработка алгоритма определения перемещений изделий между стеллажами на основе данных с их меток // Телекоммуникации. 2019. № 1. С.7-15.
2. Разработка методики комплексирования алгоритмов определения текущей зоны складирования на основе методов технического зрения и радиочастотной идентификации / А.В. Астафьев, А.А. Орлов, Д.П. Попов, М.В. Пшеничкин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2017: сборник материалов научно-техн. конф. Курск, 2017. С. 56-59.
3. Astafiev A.V., Orlov A.A., Shardin T.O. Development of an algorithm for forecasting and preventing emergency situations in industrial traffic control systems based on data analysis of multi-code identifiers // 4th International Conference on Information Technology and Nanotechnology - Session: Data Science, DS-ITNT 2018; Samara; Russian Federation; 24-27 April 2018.
4. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, О. Е. Балашов, А. И. Степашкин. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
5. Комбинированный алгоритм детектирования автомобильных регистрационных знаков / И.Н. Трапезников, А.Л. Приоров, А.А. Носков, Е.А. Аминова // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18, № 12. С. 032-037.
6. Warehouse management with lean and RFID application: a case study / James C. Chen, Chen-Huan Cheng, PoTsang B. Huang, Kung-Jen Wang, Chien-Jung Huang, Ti-Chen Ting // Int J Adv Manuf Technol, 2013, 69:531–542. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5016-8>.
7. Kumar V. V., Chan F.T.S. A superiority search and optimisation algorithm to solve RFID and an environmental factor embedded closed loop logistics model // Int J Prod Res, 2010, 49(16):4807–4831. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.503201>.
8. Soo-Cheol Kim, Young-Sik Jeong, Sang-Oh Park An indoor location tracking based on mobile RFID for smart exhibition service // J Comput Virol Hack Tech, 2014, 10:89–96. <https://doi.org/10.1007/s11416-014-0200-4>.

9. Soo-Cheol Kim, Young-Sik Jeong, Sang-Oh Park RFID-based indoor location tracking to ensure the safety of the elderly in smart home environments // *Pers Ubiquit Comput*, 2013, 17:1699–1707. <https://doi.org/10.1007/s00779-012-0604-4>.
10. Kwangsoo Kim, Myungsik Kim, Ke-Sheng Wang Intelligent and integrated RFID (II-RFID) system for improving traceability in manufacturing // *Advances in Manufacturing*. June 2014. Vol. 2, is. 2. P. 106–120.
11. Kwangsoo Kim RFID-based location-sensing system for safety management // *Pers Ubiquit Comput*, 2012, 16:235–243. <https://doi.org/10.1007/s00779-011-0394-0>.
12. Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Титов В. С. Автоматизированные нечетко-логические системы управления. М.: ИНФРА-М, 2016. С. 176.

References

1. Orlov A.A., Astafiev A.V., Privezentsev D.G. Razrabotka algoritma opredeleniya peremeshchenii izdelii mezhdru stellazhami na osnove dannykh s ikh metok [Development of an algorithm for determining the movement of products between racks based on data from their labels]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2019, no. 1, pp. 7-15 (In Russ.).
2. Astafiev A.V., Orlov A.A., Popov D.P., Pshenichkin M.V. [Development of a methodology for combining algorithms for determining the current storage zone based on the methods of technical vision and radio frequency identification]. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenii i simvol'noi informatsii. Raspoznavanie – 2017. Sbornik mater.* [Optoelectronic devices and devices in pattern recognition systems, image processing and symbolic information. Recognition - 2017]. Kursk, 2017, pp. 56-59 (In Russ.).
3. Astafiev A.V., Orlov A.A., Shardin T.O. Development of an algorithm for forecasting and preventing emergency situations in industrial traffic control systems based on data analysis of multi-code identifiers. *4th International Conference on Information Technology and Nanotechnology - Session: Data Science, DS-ITNT 2018*. Samara; Russian Federation; April 24-27, 2018.
4. Alpatov B. A., Babayan P. V., Balashov O. E., Stepashkin A. I. Metody avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov. Obrabotka izobrazhenii i upravlenie [Methods of automatic detection and tracking of objects. Image Processing and Control]. Moscow, *Radiotekhnika Publ.*, 2008, 176 p. (In Russ.).
5. Trapeznikov I.N., Priorov A.L., Noskov A.A., Aminova E.A. Kombinirovannyi algoritm detektirovaniya avtomobil'nykh registratsionnykh znakov [Combined algorithm for detecting car registration marks]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic waves and electronic systems*, 2013, vol. 18, no. 12, pp. 032-037 (In Russ.).

6. James C. Chen, Chen-Huan Cheng, PoTsang B. Huang, Kung-Jen Wang, Chien-Jung Huang, Ti-Chen Ting. Warehouse management with lean and RFID application: a case study, 2013, 69:531–542. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5016-8>.
7. Kumar V. V., Chan F.T.S. A superiority search and optimisation algorithm to solve RFID and an environmental factor embedded closed loop logistics model. *Int J Prod Res*, 2010, 49(16):4807–4831. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.503201>.
8. Soo-Cheol Kim, Young-Sik Jeong, Sang-Oh Park An indoor location tracking based on mobile RFID for smart exhibition service. *J Comput Virol Hack Tech*, 2014, 10:89–96 <https://doi.org/10.1007/s11416-014-0200-4>.
9. Soo-Cheol Kim, Young-Sik Jeong, Sang-Oh Park RFID-based indoor location tracking to ensure the safety of the elderly in smart home environments. *Pers Ubiquit Comput*, 2013, 17:1699–1707. <https://doi.org/10.1007/s00779-012-0604-4>.
10. Kwangsoo Kim, Myungsik Kim. Ke-Sheng Wang Intelligent and integrated RFID (II-RFID) system for improving traceability in manufacturing. *Advances in Manufacturing June 2014, vol. 2, is. 2, pp. 106–120*.
11. Kwangsoo Kim. RFID-based location-sensing system for safety management. *Pers Ubiquit Comput*, 2012, 16:235–243. <https://doi.org/10.1007/s00779-011-0394-0>.
12. Bobyr M., Yemyelyanov S., Titov V. Avtomatizirovannye nechetko-logicheskie sistemy upravleniya [The automated indistinct and logical control systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016, p. 176 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Астафьев Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры физики и прикладной
математики, Муромский институт (филиал)
Владимирского государственного университета
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых,
г. Муром, Российская Федерация,
e-mail: Alexaxndr.Astafiev@mail.ru

Aleksandr V. Astafiev, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor, Physics
and Applied Mathematics Department, Murom
Institute (branch) of Vladimir State University
named after A. G. and N. G. Stoletov,
Murom, Russian Federation,
e-mail: Alexaxndr.Astafiev@mail.ru

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-129-144>

Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга состояния мехатронного подшипника жидкостного трения в условиях температурно-вязкостного клина

Е.П. Корнаева¹ ✉, А.В. Корнаев¹, Н.В. Корнаев¹

¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Наугорское шоссе, 20, Россия, г. Орел, 302020, Российская Федерация

✉ e-mail: lenoks_box@mail.ru

Резюме

Цель. Одним из основных условий возникновения жидкостного трения является условие наличия изменяющегося зазора, которое обычно именуют геометрическим клином, однако это условие не является обязательным и эффект геометрического клина может быть заменен клином вязкостным. Эффект вязкостного клина для ньютоновских жидкостей может быть вызван температурной неоднородностью, а для неньютоновских – дополнительной причиной может быть неоднородность поля тензора скоростей деформаций. Таким образом, управляя температурным полем в смазочном слое можно обеспечить дополнительную несущую способность в опоре жидкостного трения, кроме того появляется возможность минимизировать потерю мощности на трение. Целью данной работы является создание управляемого температурно-вязкостного клина в подшипнике жидкостного трения. Физическая реализация данного эффекта достигается с помощью многозонной подачи смазочного материала переменной температуры.

Методы. Используются методы планирования и организации эксперимента, анализ результатов проводился путем построения траекторий и АЧХ разверток колебаний. Для решения задачи сенсорного и программного определения состояния подшипника и условий смазки используются современные методы машинного обучения, а именно, разработана искусственная нейронная сеть прямого распространения с логистическими функциями активации, позволяющая по данным измерений виброперемещений ротора и давления жидкости в подшипнике определять способ подачи смазки. Как вспомогательные используются методы линейной алгебры и безусловной оптимизации.

Результаты. Разработана экспериментальная установка в виде роторно-опорной системы с многозонной подачей смазочного материала с информационно-измерительной системой, позволяющей получать виброперемещения ротора и давление подачи жидкости; для мониторинга состояния подшипника и условий смазки разработана математическая модель в виде искусственной нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем.

Заключение. Искусственный температурно-вязкостный клин и многозонная подача смазочного материала в подшипник жидкостного трения оказывают значимое влияние на состояние гидромеханической системы. Это влияние с точностью более 95% удалось установить с помощью искусственной нейронной сети после обработки данных измерений виброперемещений ротора и давления жидкости в подшипнике.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть; логистическая регрессия; мехатроника; подшипник жидкостного трения; температурно-вязкостный клин

Благодарности: статья подготовлена в рамках выполнения Гранта Президента № МК-3394.2019.8 (формулировка задачи, построение математической модели ИНС, подготовка экспериментальной установки, планирование и проведение экспериментов в параграфах 1-3, 5), а также проекта РНФ № 16-19-00186 (анализ траекторий колебаний ротора в параграфе 4). Авторы выражают благодарность фондам за оказанную поддержку научных исследований. Авторы также выражают благодарность А.С. Фетисову, Н.В. Токмакову, А.Ю. Родичеву и А.И. Щелухову за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

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

Для цитирования: Корнаева Е.П., Корнаев А.В., Корнаев Н.В. Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга состояния мехатронного подшипника жидкостного трения в условиях температурно-вязкостного клина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 129-144. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-129-144>.

Статья поступила в редакцию 09.07.2019

Статья подписана в печать 02.08.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-129-144>

Application of Artificial Neural Networks for Monitoring Conditions of Liquid Friction Mechatron Bearing under Temperature-Viscosity Wedge Conditions

Elena P. Kornaeva ¹ ✉, Alexey V. Kornaev ¹, Nikolay V. Kornaev ¹

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev, 20, Naugorskoe, Orel, 302020, Russian Federation

✉ e-mail: lenoks_box@mail.ru

Abstract

Purpose of research. One of the basic conditions for liquid friction occurrence is a variable gap, which is usually referred to as a geometric wedge. But this condition is not necessary and the effect of a geometric wedge can be replaced by a viscous wedge. The effect of a viscous wedge for Newtonian liquids can be caused by temperature non-uniformity. And non-uniformity of strain rate tensor can be an additional cause for non-Newtonian liquids. Thus, it is possible to provide an additional bearing capacity in the fluid friction support by controlling the tempering field in the lubricating layer. It is also possible to minimize friction power loss. The purpose of this work is to create controlled temperature-viscosity wedge in a fluid friction bearing. Physical realization of this effect is achieved by a multi-zone supply of variable temperature lubricant.

Methods. Experimental study planning and organization were used. Results analysis was carried out by means of paths construction and AFRC oscillatory patterns. Modern methods of machine learning are used in order to solve sensory and program determination problem of bearing and lubrication conditions. Artificial neural network of direct propagation with logistical activation functions has been developed. This network allows determining the method of lubricant supply from measurements of rotor vibration displacements and fluid pressure in the bearing. Methods of linear algebra and unconditional optimization methods are used as supplementary.

Results. Experimental apparatus in the form of rotor-support system with multizone lubricant supply with information-measuring system, which can receive rotor vibration displacement and liquid pressure supply has been developed. Mathematical model in the form of artificial neural network of direct distribution with one hidden layer was developed to monitor bearing and lubrication conditions.

Conclusion. Artificial temperature-viscosity wedge and multi-zone supply of lubricant to fluid friction bearing have a significant effect on hydro mechanical system. This effect, with an accuracy of more than 95%, was defined by an artificial neural network after processing the rotor vibration displacement and bearing fluid pressure measurements.

Keywords: artificial neural network; logistic regression; mechatronics; fluid friction bearing; temperature-viscosity wedge.

Acknowledgements: the article was prepared as part of the implementation of the Presidential Grant No. MK-3394.2019.8 (formulation of the problem, construction of the mathematical model of the ANN, preparation of the test rig, planning and conducting experiments in paragraphs 1-3, 5), as well as the RSF project No. 16-19-00186 (analysis of the rotor oscillation trajectories in paragraph 4). The authors are grateful to the foundations for their support of scientific research. The authors also thank A.S. Fetisov, N.V. Tokmakov, A.Yu. Rodichev and A.I. Shchelohov for help in preparing and conducting the experiment.

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

For citation: Kornaeva E. P., Kornaeve A. V., Kornaeve N. V. Application of Artificial Neural Networks for Monitoring Conditions of Liquid Friction Mechatron Bearing under Temperature-Viscosity Wedge Conditions Alloys. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 129-144 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-4-129-144](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-129-144).

Received 09.07.2019

Accepted 02.08.2019

Введение

Контактное взаимодействие движущихся деталей является наиболее распространенной причиной износа. Бесконтактные сопряжения позволяют разделить движущиеся детали посредством промежуточной жидкой или газообразной рабочей среды и действия гидродинамических сил, или посредством электромагнитного поля и действия электромагнитных сил. В данной работе исследуются опоры жидкостного трения роторных машин. Одним из основных условий возникновения жидкостного трения является условие наличия изменяющегося зазора, которое обычно именуют геометрическим клином. Можно показать, что это условие не является обязательным и эффект геометрического клина может быть за-

менен клином вязкостным или плотностным [1]. Исследование подобных эффектов известно из работ А. Фогга (1946 г.), У. Коупа [1]. Позднее этот эффект был объяснен Д. Доусоном в большей мере термическим расширением деталей сопряжения, а Дж. Янг в своих исследованиях показал, что для получения значительной несущей способности необходимы большие градиенты температур и очень тонкие слои жидкости [1, 2]. Тем не менее, исследования в этой области не прекратились [3]. Эффект вязкостного клина для ньютоновских жидкостей может быть вызван температурной неоднородностью, а для неньютоновских дополнительной причиной может быть неоднородность поля тензора скоростей деформаций. В работах [4, 5] авторами теоретически и экспериментально обоснована принци-

пиальная возможность создания дополнительной несущей способности и снижения коэффициента трения для легких роторов на подшипниках жидкостного трения. Данная работа является продолжением работ [4, 5] с расширением возможности создания дополнительной несущей способности смазочного слоя на основе интеллектуальной диагностики состояния роторно-опорной системы и управления вязкостью.

Для исследования сложных гидродинамических эффектов на современном уровне необходимо привлечение высокоточных средств мониторинга и распознавания состояния гидромеханических систем по комплексу измеряемых параметров [6-8]. Основной целью данной работы является разработка и тестирование программных средств мониторинга состояния роторно-опорной системы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС).

Материалы и методы

Математические основы решения задачи диагностики с использованием искусственных нейронных сетей

Рассматриваемая задача классификации относится к типу задач обучения с учителем [9]. То есть, для разработки программы-классификатора необходима обучающая выборка, данные в которой правильно разделены на классы.

Принцип классификации сначала рассматривается на примере двух классов, а после обобщается. В качестве переменной отклика выступает дискрет-

ная величина, принимающая два значения $Y = \{0;1\}$. Например, это одно из двух положений насадки для подачи смазочного материала в подшипник жидкостного трения. Для случая одного входного фактора, например, давления в смазочном слое, задачу классификации можно представить графически, как это сделано на рис. 1 (а). Из рисунка видно, что каждому значению входного фактора $U = (u_i)$ из обучающей выборки (u_i, y_i) соответствует отклик в виде нуля или единицы. Задача сводится к аппроксимации этих данных, так называемой логистической регрессией, представленной на рис. 1 (б).

Перед аппроксимацией значения фактора преобразовывается в вид $z = f(u)$ так, чтобы один класс соответствовал отрицательным значениям видоизмененного фактора, а другой – положительным. В качестве аппроксимирующей функции удобно выбрать непрерывную функцию вида [9]:

$$H_0(u) = (1 + \exp(-z(u)))^{-1}, \quad (1)$$

которая принимает значения в интервале $[0;1]$. Тогда принадлежность i^{zo} объекта к конкретному классу определяется функцией (1) в соответствии с правилом:

«если $H_0(u_i) \geq 0.5$, то $y_{i_{теор}} = 1$, иначе $y_{i_{теор}} = 0$ ».

Граница классов определяется соотношением $H_0(u) = 0.5$, что соответствует нулевому значению функции $z(u) = 0$.

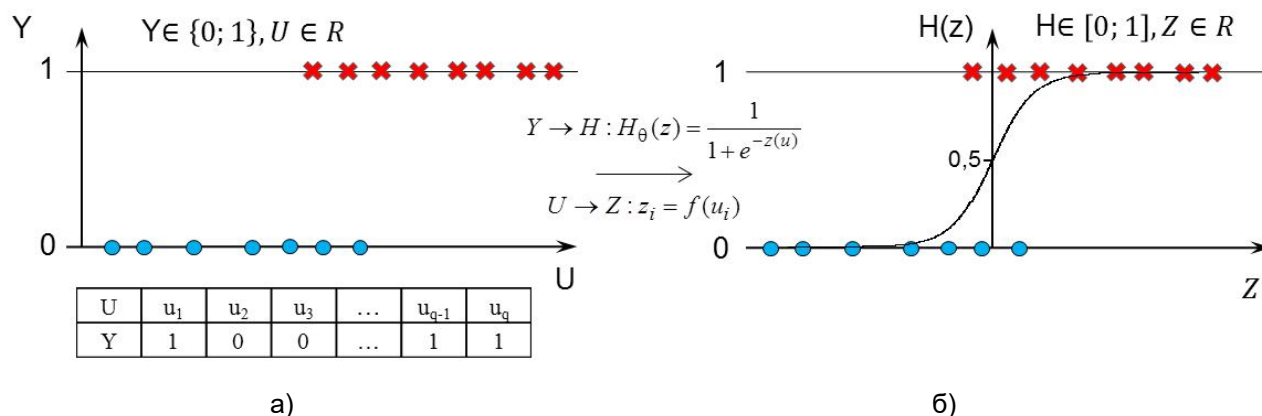


Рис. 1. Задача классификации: а – принадлежность элементов выборки к одному из двух классов; б – логистическая регрессия для аппроксимации классов в терминах видоизмененного фактора Z

Fig. 1. Classification: a - membership of the sample in one of two classes; b – logistic regression for approximation of class

На рисунке 2(а) представлен случай с линейной границей $z(\mathbf{U}) = \theta_j u_j^1$ между классами для случая двух переменных. В общем случае, граница между классами может быть нелинейной, тогда ее можно описывать полиномами различных степеней, например на рисунке 2(б) изображена граница $z(\mathbf{U}) = 0$ в виде полинома второй степени:

$$z(\mathbf{U}) = \theta_0 + \theta_1 u_1 + \theta_2 u_2 + \theta_3 u_1^2 + \theta_4 u_2^2. \quad (2)$$

Последнее выражение, как и полином любой степени, можно преобразовать к линейному виду посредством замены [10]:

$$z(\mathbf{U}) = \theta_j u_j, \quad j = \overline{0, N}, \quad u_0 = 1, \quad (3)$$

вводя новые факторы: $u_3 = u_1^2$, $u_4 = u_2^2$, где N - итоговое количество факторов.

Так как значения исходных факторов известны, то определить значения

новых факторов не представляет сложности. Для полиномов старших степеней, в том числе и со смешанными слагаемыми, уравнение границы может быть преобразовано к виду (3). При этом функция ошибки должна быть модифицирована, чтобы избежать так называемого эффекта переобучения [9].

После указанных преобразований, для представления вычислений весовых коэффициентов в матричном виде можно ввести матрицу значений факторов χ , состоящую из матрицы планирования, дополненную новыми факторами, в том числе и единичным столбцом.

$$\chi = \begin{pmatrix} 1 & u_{11} & u_{12} & u_{11}^2 & u_{12}^2 \\ 1 & u_{21} & u_{22} & u_{21}^2 & u_{22}^2 \\ 1 & u_{31} & u_{32} & u_{31}^2 & u_{31}^2 \\ \dots & & & & \\ 1 & u_{Q1} & u_{Q2} & u_{Q1}^2 & u_{Q2}^2 \end{pmatrix},$$

где Q – объем обучающей выборки;

¹ Здесь и далее используется правило Эйнштейна суммирования по индексам и исключение Лурье.

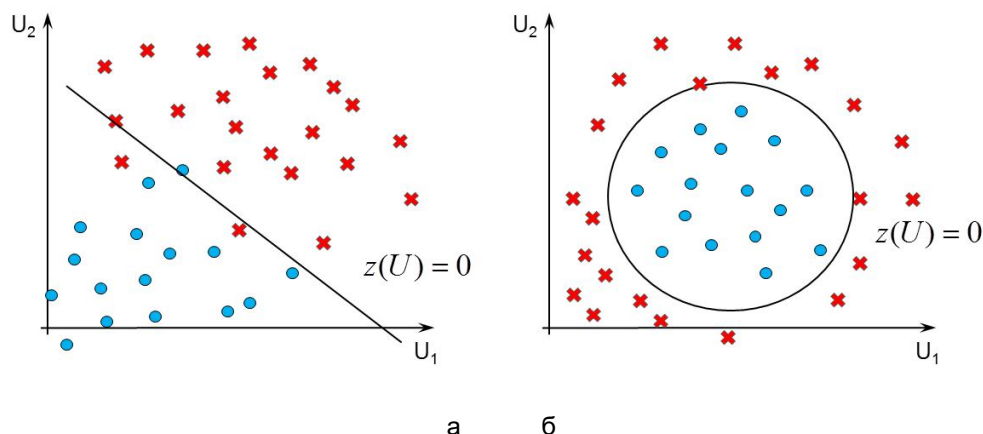


Рис. 2. Границы классов в двухфакторном пространстве: а – линейная граница; б – нелинейная граница

Fig. 2. Class boundaries in two-factor space: а – linear border; б – nonlinear border

Вычисление значений в дополнительных столбцах матрицы χ для полинома произвольной степени d от двух факторов можно записать в виде (здесь и далее используется синтаксис GNU Octave¹):

```
«for i = 1:d
    for j = 0:i
         $\chi(:, \text{end}+1) = (u1.^{(i-j)}) .* (u2.^j);$ 
    end
end».
```

Для рассматриваемой в данной работе задачи количество классов превышает два, поэтому для классификации была использована нейронная сеть, архитектура которой представлена на рисунке 3. Входной слой содержит $N_{inp} + 1$ нейронов, где N_{inp} – количество факторов. В выходном слое сети количество нейронов равно количеству классов, а значения в каждом нейроне соответствуют значению логистической функ-

ции типа (1) для каждого элемента выборки объемом Q . Таким образом, на выходе получается матрица размерности $[Q \times N_{out}]$, столбцы которой соответствуют номеру класса, а значения в них (1) соответствуют степени принадлежности этому классу. Другими словами для многоклассовой классификации с помощью нейронной сети как и в случае с простой логистической регрессией реализуется простой принцип «один против всех» [9]. Скрытый слой представлен $N_{hid} + 1$ нейроном. Сумматор скрытого слоя представляет собой линейную комбинацию входных значений с учетом фиктивного фактора $u_0 = 1$ ф.(3). Сумматор выходного слоя – также линейная комбинация значений в $N_{hid} + 1$ нейроне, включая фиктивный с единичным значением. В качестве функции активации на скрытом и выходном слое используется «сигмоида» типа (1).

¹ GNU Octave. URL: [http:// www.gnu.org/ software/octave](http://www.gnu.org/software/octave) (дата обращения 01.07.2019).

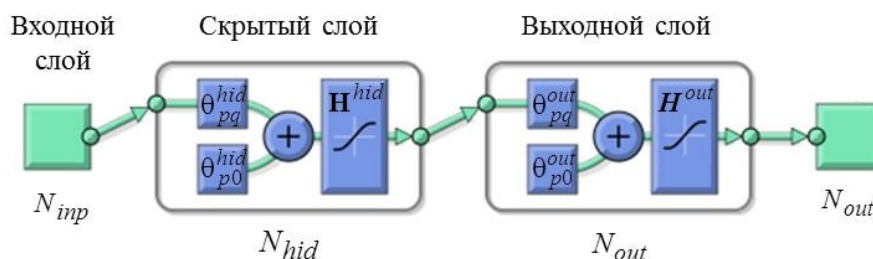


Рис. 3. Архитектура ИНС для решения задачи классификации

Fig. 3. ANN architecture for solving the classification problem

Неизвестные весовые коэффициенты для каждого слоя l представлены в виде матриц $\theta^{(l)} = (\theta_{pq}^{(l)})$, $l = 1, 2$, где индекс p соответствует номеру нейрона текущего слоя l , а q - предыдущего $l - 1$.

Функция активации на скрытом слое рассчитывается как сигмоида (1) от линейной комбинации входов:

$$\mathbf{H}^{hid}(\theta^{hid}, \chi) = H_{\theta}(\chi(\theta^{hid})^T), \quad (4)$$

где $\mathbf{H}^{hid}$ – матрица размерностью $[Q \times L]$ значений в нейронах скрытого слоя для каждого элемента выборки;

θ^{hid} – матрица весовых коэффициентов размерностью $[L \times (N + 1)]$ для скрытого слоя.

Функция активации на выходном слое рассчитывается как сигмоида (1) от линейной комбинации нейронов скрытого слоя, дополненного единичным членом:

$$\mathbf{H}^{out}(\theta^{hid}, \theta^{out}, \chi) = H_{\theta}(\tilde{\mathbf{H}}^{hid}(\theta^{out})^T), \quad (5)$$

где $\mathbf{H}^{out}$ – матрица размерностью $[Q \times K]$ значений в нейронах скрытого слоя для каждого элемента выборки;

$\tilde{\mathbf{H}}^{hid}$ – матрица размерностью $Q \times (L + 1)$ значений в нейронах скрыто-

го слоя для каждого элемента выборки, дополненная единичным столбцом;

θ^{out} – матрица весовых коэффициентов размерностью $[K \times (L + 1)]$ для выходного слоя.

Процедура прямого распространения для расчета значений выходного слоя $\mathbf{H}^{out}$ выполняется по формулам (4) – (5), при этом начальные значения весовых коэффициентов $\theta^{(l)}$ задаются с помощью равномерно распределенной случайной величины $R \sim (0; 1)$.

Дальнейшая процедура вычисления весовых коэффициентов представляет собой задачу безусловной оптимизации функции ошибки, которая для логистической регрессии с учетом процедуры регуляризации может быть представлена в виде:

$$J(\theta^{hid}, \theta^{out}) = -\frac{1}{Q}(\tilde{y}_{ip}(\ln H_{pi}^{out}) + (1 - \tilde{y}_{ip})(\ln(1 - H_{pi}^{out}))) + \frac{\lambda}{2Q}(\theta_{pq}^{hid}\theta_{pq}^{hid} + \theta_{pq}^{out}\theta_{pq}^{out}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $p = \overline{1, K}$ – номера классов;

H_{pi}^{out} – компоненты матрицы $\mathbf{H}^{out}$

со значениями на выходном слое как сложная функция (5) от коэффициентов скрытого и выходного слоев;

$\tilde{Y}_{ip} = (\tilde{y}_{ip})$, $\tilde{y}_{ip} = (y_{ip} \equiv p)$ – известные значения классов из множества $\{0;1\}$, $i = \overline{1, Q}$;

λ – коэффициент регуляризации.

Процедура определения неизвестных весовых коэффициентов для большого количества факторов выполняется численно методом градиентного спуска. Компоненты градиента функции ошибки (6) могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial \theta_{p0}^{out}} = \frac{1}{Q} \delta_{pi}^{out} \tilde{H}_{iq}^{hid}, \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_{pq}^{out}} = \frac{1}{Q} (\delta_{pi}^{out} \tilde{H}_{iq}^{hid} + \lambda \theta_{pq}^{out}), \end{cases} \quad (7)$$

где $\delta_{ip}^{out} = (H_{ip}^{out} - \tilde{Y}_{ip})$, $\tilde{Y}_{ip} = (\tilde{y}_{ip})$, $\tilde{y}_{ip} = (y_i \equiv p)$, $p = \overline{1, K}$, $q = \overline{1, L+1}$, $i = \overline{1, Q}$.

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial \theta_{p0}^{hid}} = \frac{1}{Q} \hat{\delta}_{pi}^{hid} \chi_{iq}, \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_{pq}^{hid}} = \frac{1}{Q} (\hat{\delta}_{pi}^{hid} \chi_{iq} + \lambda \theta_{pq}^{hid}), \end{cases} \quad (8)$$

где $\delta_{iq}^{hid} = \delta_{ip}^{out} \theta_{pq}^{out}$, $i = \overline{1, Q}$, $p = \overline{1, L+1}$,

$\hat{\delta}_{ip}^{hid} = \delta_{ip}^{hid} H_{ip}^{hid} (1 - H_{ip}^{hid})$, $p = \overline{2, L+1}$,

$i = \overline{1, Q}$, $q = \overline{1, N+1}$.

Итерационная процедура выполнялась с помощью стандартной функции «fminunc()», библиотеки «GNU Octave». Аргументами функции «fminunc()» являются значения компонент градиента функции ошибки (7) – (8) и значение функции ошибки (6), вычисляемые на предыдущем шаге.

Экспериментальная установка

Экспериментальная работа выполнялась на оборудовании проблемной научно-исследовательской лаборатории «Моделирование гидромеханических систем» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Экспериментальная установка представляет собой модель роторно-опорной системы со сменными опорами. В данном случае в левой опоре устанавливались подшипник качения и контактное уплотнение, в правой опоре – мехатронный подшипник жидкостного трения как на рисунке 4. Смазка подшипника жидкостного трения водой осуществлялась подачей жидкости из двух гидроаккумуляторов в торцевую часть подшипника и ротора через крышку со специальной насадкой, разделяющей потоки из двух гидроаккумуляторов. Разделение потоков необходимо для создания условий температурно-неоднородной смазки, как это показано на рисунке 5. Привод ротора обычно осуществлялся от асинхронного двигателя, но в данном эксперименте с целью снижения помех в сети использовался электропривод с планетарным редуктором и автономным электропитанием.

Вихретоковые преобразователи «АЕ051.00.07» в сочетании с устройством согласования «D210А-С.05.05» использовались для измерения виброперемещений ротора в двух взаимно перпендикулярных направлениях в диапазоне расстояний 0,1 – 2,1 мм с погрешностью не более 5% после обработки сигнала в устройстве согласо-

ния. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой использовалось шасси «NI cDAQ 9178» с модулем «NI 9205», которое подключается к пользовательскому компьютеру. Для измерения давления в области подачи жидкости в подшипник использовался датчик «Б-3». Также система измерений включала поточные расходомеры «YF-S201», сер-

воклапаны «EV260B» и датчики температуры «LM135Z», однако в данном эксперименте они не использовались.

С помощью разработанной программы измерение виброперемещений ротора и давления подачи жидкости производилось в режиме реального времени с частотой записи показаний первичных преобразователей 1000-8000 Гц.

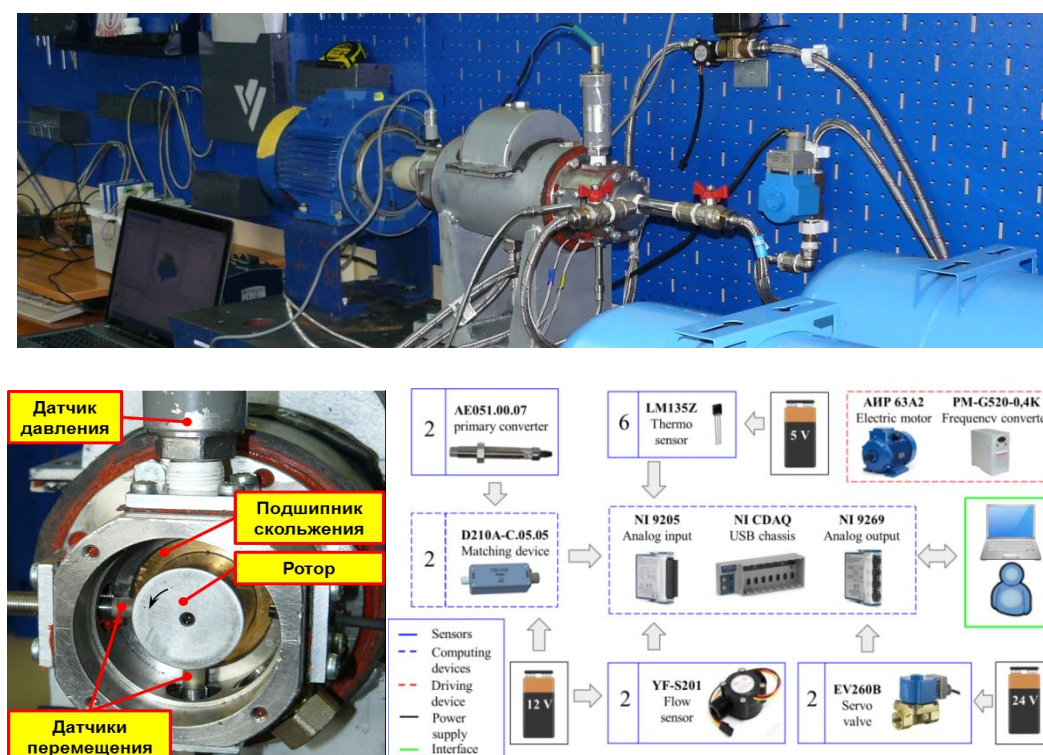


Рис. 4. Фотография установки (сверху), мехатронный подшипник жидкостного трения (слева снизу) и схема информационно-измерительной системы (справа снизу)

Fig. 4. Test rig photo (top), mechatronic fluid friction bearing (bottom left) and information measuring system diagram (bottom right)

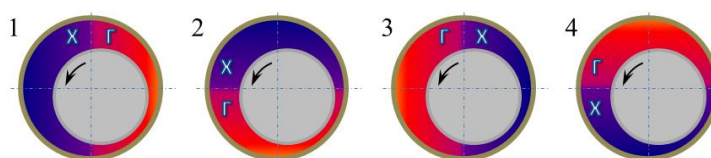


Рис. 5. Температурно-неоднородная смазка подшипника жидкостного трения для четырех положений насадки зонной подачи жидкости в подшипник

Fig. 5. Temperature-inhomogeneous lubrication of the fluid friction bearing for four positions of the nozzle of the zone fluid supply to the bearing

План натурных исследований включал 3 эксперимента. В первом эксперименте оба гидроаккумулятора были заполнены холодной водой температурой $24 \pm 0,5$ °С. Во втором эксперименте один гидроаккумулятор был заполнен холодной водой, а другой – горячей ($51 \pm 0,5$ °С). В третьем эксперименте оба гидроаккумулятора были заполнены горячей водой. Каждый эксперимент включал 13-15 опытов при различных положениях насадки зонной подачи. Одно из четырех возможных положений крышки определяло способ подачи смазочного материала и выбиралось для каждого опыта с помощью генератора случайных чисел. Каждый опыт продолжался около 10 с, в течение которых с частотой 1000 Гц производилась запись показаний двух датчиков виброперемещений и датчика давления. Опыты проводились на одной зарядке гидроаккумуляторов.

Результаты и их обсуждение

Анализ траекторий движения ротора

Известны следующие основные причины колебаний роторов [10]: 1) резонансные колебания на критических частотах; 2) параметрические колебания, связанные, например, с движением тел вращения в подшипниках качения; 3) самовозбуждающиеся колебания благодаря внутренним свойствам демпфирования ротора; 4) самовозбуждающиеся колебания в смазочном слое подшипников жидкостного трения; 5) вибрации, вызванные течением. Первый

тип колебаний серьезно проявляется в несбалансированных роторах при достижении критических частот вращения. Второй присущ роторам с подшипниками качения. Третий обычно наблюдается на роторах сборной конструкции и проявляется в возникновении вибраций в элементах сопряжений деталей ротора. Четвертый тип колебаний наиболее опасен, обычно возникает на удвоенной критической частоте и сопровождается высокими амплитудами, причем колебания не исчезают с ростом частоты вращения. Такое явление в зарубежной литературе называется «oil whip» [11-13]. Смазочный слой может являться причиной дробно-частотных колебаний. Например, следствием переизбытка смазочного материала является полускоростной вихрь, то есть колебания на частоте, равной половине частоты вращения. Так как причиной является избыток жидкости, то для решения проблемы появления полускоростного вихря необходимо создать условия оттока жидкости из конфузурной области в осевом направлении. В этой связи на практике применяют подшипники с отношением длины к диаметру не более 0,25: $L/D \leq 0,25$. Пятый тип колебаний обычно совпадает по частоте с собственной частотой ротора.

В данной работе измерение виброперемещений ротора производилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По результатам измерений анализировались траектории, развертки колебаний и их амплитудно-частотные характеристики (рис. 6).

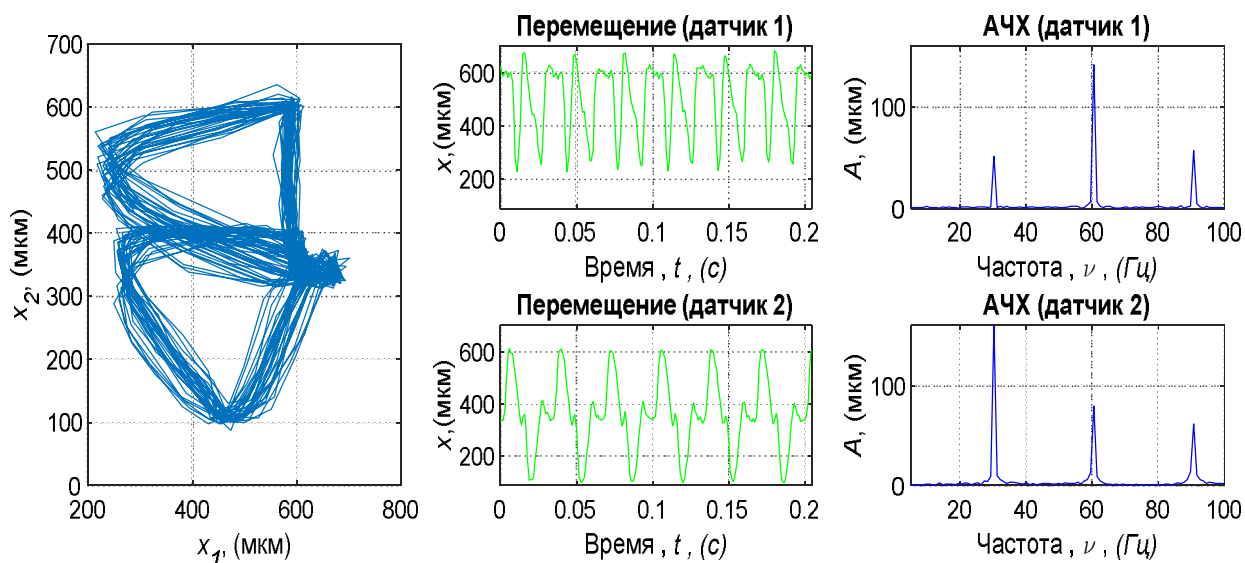


Рис. 6. Фрагмент траектории колебаний (слева), разверток по двум осям (посередине) и их амплитудно-частотные характеристики (справа)

Fig. 6. Fragment of the trajectory of oscillations (left), sweeps along two axes (in the middle) and their amplitude-frequency characteristics (right)

Из результатов, представленных на амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ), видно, что колебания ротора являются полигармоническими. Первый пик АЧХ совпадает с частотой вращения, которая составляла около 28-30 Гц. Следующие пики кратны частоте вращения. Колебания наибольшей амплитуды происходили на частоте вращения и на удвоенной частоте вращения. Вероятно, они вызваны несбалансированностью ротора и внешним воздействием периодического характера, в данном случае действием электропривода с планетарным редуктором или вращением подшипника качения, установленного в левой опоре (рис. 4).

Так как план эксперимента включал 4 различных варианта расположения питающих камер, сменяющихся поворотом насадки зонной подачи, то в ре-

зультате анализа траекторий необходимо было определить влияние положения насадки на вид траекторий. На рисунке 7 представлена случайная выборка фрагментов траекторий с указанием положения насадки.

Анализ разверток и АЧХ колебаний не позволил выявить закономерностей влияния способа подачи смазочного материала на траектории колебаний. Возможно, что анализ осложнен наличием помех, наведенных датчиками друг на друга. Об этом свидетельствует «угловатая» форма траекторий.

Фильтрация сигналов не производилась намеренно, так как она может вести к потере важных данных. В следующем параграфе анализ траекторий выполняется с применением классификатора на основе ИНС.

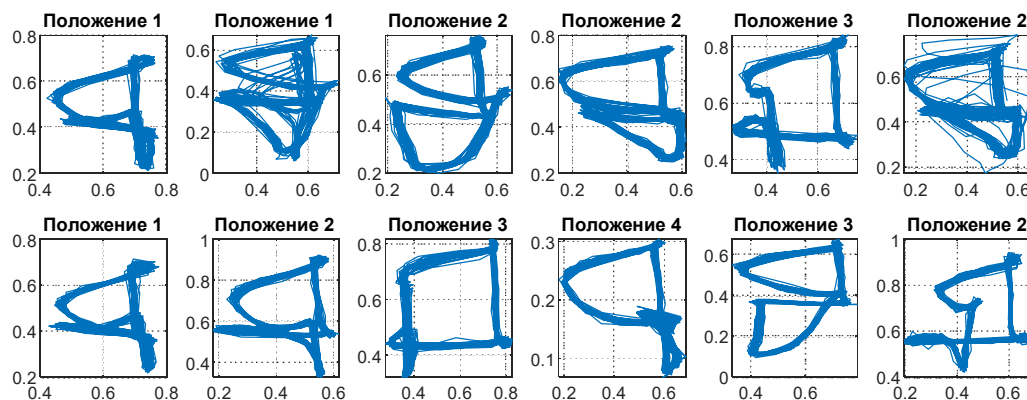


Рис. 7. Случайная выборка фрагментов траекторий движения ротора в различных опытах, полученных без фильтрации сигналов, при различных положениях крышки подачи смазочного материала

Fig. 7. Random sampling of fragments of the trajectories of the rotor in various experiments obtained without filtering the signals at various positions of the lubricant supply cover

Диагностика состояния роторно-опорной системы с помощью ИНС

Для диагностики состояния роторно-опорной системы посредством решения задачи классификации использовалась нейронная сеть с архитектурой, представленной на рис. 3. Использовалась ИНС прямого распространения с одним скрытым слоем размером N_{hid} , и выходным слоем размером N_{out} с 4 нейронами. Сигмоидная функция (1) использовалась в качестве функции активации в скрытом и в выходном слое. Входной слой нейронной сети в виде матрицы-столбца U формировался из данных измерений виброперемещений ротора и давления согласно плану вычислительного эксперимента (табл.). На выходе из нейронной сети определялась вероятность каждого из четырех возможных положений крышки. В качестве ответа ИНС выбиралось состояние с наибольшей вероятностью.

Для анализа точности решения задачи классификации была проведена серия вычислительных экспериментов, план и результаты которого представлены в таблице. Данные для проведения вычислительного эксперимента случайным образом изымались из данных физического эксперимента по измерению виброперемещений ротора и давления в подшипнике. По плану вычислительного эксперимента варьировалось количество обучающих выборок Q , их размер N_{inp} и состав, а также количество нейронов в скрытом слое N_{hid} . В каждом вычислительном эксперименте варьировался один из 4 факторов, остальные устанавливались на среднем уровне. Обучающие выборки разбивались на 3 части: $0.75Q$, $0.15Q$, $0.15Q$, для проведения обучения, валидации и тестирования ИНС соответственно.

Результаты вычислительного эксперимента по классификации
данных физического эксперимента с помощью ИНС

Results of a computational experiment to classify data from
a physical experiment using ANN

№	Варьируемые параметры ИНС (Variable ANN parameters)	Значения параметров (Parameter values)	Ошибка, % (Error, %)		
			Обучение (Training)	Валидация (Validation)	Тестирование (Testing)
1	Объем обучающих выборок, Q	3000	8.2	18.4	16.7
		6000	7.1	11.3	12.7
		9000	6.0	11.3	11.3
2	Количество нейронов в скрытом слое, N_{hid}	10	12.7	17.9	18.6
		15	7.1	11.3	12.7
		20	1.2	5.4	7.9
3	Количество нейронов во входном слое, N_{inp}	$U = [300, 1]$	6.5	12.8	15.6
		$U = [900, 1]$	7.1	11.3	12.7
		$U = [1500, 1]$	6.3	12	11.6
4	Состав матрицы входного слоя	$U = [X_1]$	13	18.6	20.7
		$U = [X_1 X_2]$	7.1	11.3	12.7
		$U = [X_1 X_2 p]$	1.7	3.8	4.2

Из результатов вычислительного эксперимента видно, что наибольшее влияние на точность оказали состав матрицы входного слоя и количество нейронов в скрытом слое. В меньшей мере повлияли объем обучающих выборок и количество нейронов во входном слое (в указанных в таблице диапазонах). Наилучший результат был получен в случае использования данных измерений всех трех датчиков. И наоборот, худший результат решения задачи классификации был получен при использовании результатов измерения с одного датчика виброперемещений. Таким образом, в результате проведения серии вычислительных экспериментов была достигнута точность 95,8 % в ре-

шении задачи классификации и диагностики состояния роторно-опорной системы. В ходе анализа результатов обучения, валидации и тестирования ИНС явления переобучения не было выявлено.

Выводы

Искусственный температурно-вязкостный клин и многозонная подача смазочного материала в подшипник жидкостного трения оказывают значимое влияние на состояние гидромеханической системы. Это влияние с точностью более 95% удалось установить с помощью искусственной нейронной сети после обработки данных измерений виброперемещений ротора и давления жидкости в подшипнике. Обычный ин-

женерный анализ амплитудно-частотных характеристик и разверток колебаний ротора не позволил выявить отличительных признаков для различных условий проведения эксперимента. Таким образом, искусственные нейронные сети являются действенным и доступным средством диагностики состояния роторных систем с подшипниками жидкостного трения. Используемая в данной работе комплектация оборудования не позволила определить количественный эффект влияния температурно-вязкостного клина на потери энергии в

опорах жидкостного трения. Этот вопрос будет исследован в дальнейшем.

Авторский вклад

Е.П. Корнаева выполнила постановку задач исследования, разработала математическую модель ИНС, выполнила анализ результатов экспериментов. А.В. Корнаев выполнил обзор работ, подготовил план эксперимента, произвел анализ траекторий в п. 4, совместно с Н.В. Корнаевым разработал программу для реализации ИНС, провел вычислительный эксперимент.

Список литературы

1. Wang Q.J., Chung Y.-H. Encyclopedia of tribology. New York: Springer Science + Business Media, 2013. 4192 p.
2. Young J. Thermal wedge effect in hydrodynamic lubrication // The Engineering Journal. 1962. Vol. 45. P. 46–54.
3. Meng Xi, Khonsari M.M. On the effect of viscosity wedge in microtextured parallel surfaces // Tribology International. 2017. Vol. 107. P. 116 – 124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.007>.
4. Kornaev A.V., Kornaeva E.P., Savin L.A. Theoretical premises of thermal wedge effect in fluid-film bearings supplied with a non-homogeneous lubricant // International Journal of Mechanics". 2017. Vol. 11. P. 197-203.
5. Корнаева Е.П., Корнаев А.В., Савин Л.А. Моделирование неизотермического течения вязкой жидкости в конфузорных каналах в условиях многозонной подачи смазочного материала // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 5(80). С. 109-118.
6. Xi. Li, Zhang W., Ding Q. Deep learning-based remaining useful life estimation of bearings using multi-scale feature extraction // Reliability Engineering and System Safety. 2019. Vol.182. P. 208-218.
7. Wang X., Jiang B., Lu N., Zhang Ch. Dynamic fault prognosis for multivariate degradation process // Neurocomputing. 2018. no. 275. P. 1112-1120.
8. Сулимов В.Д., Шкапов П.М., Сулимов А.В. Геометрические структуры и вычислительная диагностика динамических систем с использованием гибридных алго-

ритмов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 4-1 (330). С. 3-13.

9. Goodfellow I., Bengio Yo., Courville A. Deep Learning. MIT Press., 2016; 802 p.

10. Hori Y. Hydrodynamic Lubricatio. Tokyo: Yokendo Ltd., 2006. 239 p.

11. Eling R., Wierik M., Ostayen R., Rixen D. Towards Accurate Prediction of Unbalance Response, Oil Whirl and Oil Whip of Flexible Rotors Supported by Hydrodynamic Bearings // Lubricants. 2016. Vol. 4. 18 p., <https://doi.org/10.3390/lubricants4030033>.

12. Yamamoto T. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications. New York: John Wiley&Sons, 2001.

13. Childs D. Turbomachinery rotordynamics. Phenomena, modeling, and analysis. New York: John Wiley&Sons, 1993. ISBN 0-471-53840-X.

References

1. Wang Q.J., Chung Y.-H. Encyclopedia of tribology. New York: Springer Science + Business Media; 2013, 4192 p.

2. Young J. Thermal wedge effect in hydrodynamic lubrication. *The Engineering Journal*, 1962, vol. 45, pp. 46–54.

3. Meng Xi, Khonsari M.M. On the effect of viscosity wedge in microtextured parallel surfaces. *Tribology International*, 2017, vol. 107, pp. 116 – 124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.007>.

4. Kornaev, A.V., Kornaeva E.P., Savin L.A. Theoretical premises of thermal wedge effect in fluid-film bearings supplied with a non-homogeneous lubricant. *International Journal of Mechanics*, 2017, vol. 11, pp. 197-203.

5. Kornaeva E.P., Kornaev A.V., Savin L.A. Modelirovanie neizotermicheskogo techeniya vyazkoi zhidkosti v konfuzornykh kanalakh v usloviyakh mnogozonnoi podachi smazochного материала [Modelling of the Nonisothermal Current of Viscous Liquid in Konfuzorny Channels in the Conditions of Multizonal Giving Lubricant]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 5(80), pp. 109-118 (In Russ.).

6. Xi. Li, Zhang W., Ding Q. Deep learning-based remaining useful life estimation of bearings using multi-scale feature extraction. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, vol.182, pp. 208-218.

7. Wang X., Jiang B., Lu N., Zhang Ch. Dynamic fault prognosis for multivariate degradation process. *Neurocomputing*, 2018, 275, pp. 1112-1120.

8. Sulimov V. D., Shkapov P. M., Sulimov A.V. Geometricheskie struktury i vychislitel'naya diagnostika dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem gibridnykh algoritmov [Geometric structures and numerical diagnostics of dynamic systems using hybrid algo-

rithms]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2018, no. 4-1 (330), pp. 3-13 (In Russ.).

9. Goodfellow I., Bengio Yo., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016, 802 p.

10. Hori Y. Hydrodynamic Lubricatio. Tokyo: Yokendo Ltd., 2006, 239 p.

11. Eling R., Wierik M., Ostayen R., Rixen D. Towards Accurate Prediction of Unbalance Response, Oil Whirl and Oil Whip of Flexible Rotors Supported by Hydrodynamic Bearings. *Lubricants*, 2016, vol. 4, 18 p. <https://doi.org/10.3390/lubricants4030033>.

15. Yamamoto T. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications. New York, John Wiley&Sons, 2001.

13. Childs D. Turbomachinery rotordynamics. Phenomena, modeling, and analysis. New York; John Wiley&Sons, 1993. ISBN 0-471-53840-X.

Информация об авторах / Information about the Authors

Корнаева Елена Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: lenoks_box@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0123-4004>, Researcher ID: N-1920-2016

Elena P. Kornaeva, Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the information systems, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: lenoks_box@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0123-4004>, Researcher ID: N-1920-2016

Корнаев Алексей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник ПНИЛ «Моделирование гидромеханических систем», ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: rusakor@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5121-6045>, Researcher ID: A-6168-2015

Alexey V. Kornaev, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Modeling of Hydro and Mechanical Systems Research Laboratory, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: rusakor@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5121-6045>, Researcher ID: A-6168-2015

Корнаев Николай Валерьевич, аспирант кафедры мехатроники, механики и робототехники, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: rusnkor@bk.ru

Nikolay V. Kornaev, Post-Graduate Student, Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics, Orel State University named after I.S. Turgenev, Russia, 302020, Orel, Naugorskoe, 20, e-mail: rusnkor@bk.ru