

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 25 № 3 / 2021



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 25 № 3 / 2021



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

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

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2021



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.

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

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 21.10.2021.

Дата выхода в свет 30.11.2021. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 21,2.

Тираж 1000 экз. Заказ 74.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher:
"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

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

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str. 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 41219

in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2021



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

Singed to print 21.10.2021.

Release date 30.11.2021. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 21,2.

Circulation 1000 copies. Order 74.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия 8

Еремеева Ж.В., Агеев Е.В., Шарипзянова Г.Х., Капланский Ю.Ю., Ниткин Н.М., Ахметов А.С., Орлов В.Л., Саенко А.А.

Математическое моделирование ходьбы человека в реабилитационном экзоскелете с помощью метода видеоанализа походки 27

Печурин А. С., Федоров А. В., Яцун А. С., Яцун С. Ф.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Архитектурно-конструктивные принципы строительства деревянных зданий возрастом более ста лет 41

Ступишин Л.Ю., Масалов А.В.

Организация промышленного строительства АЭС на глобальном рынке с учетом моделирования надежности на прединвестиционных этапах 56

Березка В.В., Баронин С.А., Бредихин В.В., Зобнев А.В.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей 70

Милостная Н. А.

Чебышёвский альтернанс при аппроксимации начальных условий обратной задачи Коши..... 86

Локтионов А. П.

Моделирование системы управления исполнительных звеньев реабилитационного экзоскелета с учетом эффекта спастичности103

Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Постольный А.А., Яцун А.С.

Выбор кинематической структуры модульной робототехнической системы в зависимости от типа поверхности передвижения120

Савельев А.И., Блинов Д.В., Ерашов А.А.

Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры136

Клименко А. Б.

Двухэтапный подход к распознаванию коррозии металлических конструкций с использованием сверточных нейронных сетей в ходе проведения инспекций промышленных объектов152

Русаков К. Д., Чехов А. В.

Оценка параметров высокоскоростных линий связи для высоконадежных реконфигурируемых систем на базе S-параметров и BER167

Орда-Жигулина М. В.

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCES

Original articles

Investigation of Molding Process and Consolidation of Preforms from Mechanically Synthesized Powders of Europium and Cerium Hafnates	8
---	----------

Eremeeva Z. V., Ageev E. V., Sharipzyanova G. H., Kaplansky Y. Yu., Nitkin N. M., Akhmetov A. S., Orlov V. L., Saenko A. A.

Mathematical Modeling of Human Gait in a Rehabilitation Exoskeleton Using Gait Video Analysis Method	27
---	-----------

Pechurin A. S., Fedorov A. V., Jatsun A. S., Jatsun S. F.

CONSTRUCTION

Original articles

Architectural and Structural Principles of Construction of Wooden Buildings over a Hundred Years Old....	41
---	-----------

Stupishin L. Yu., Masalov A. V.

Organization of Industrial Construction of Nuclear Power Plants in the Global Market, Taking into Account Reliability Modeling at Pre-investment Stages.....	56
---	-----------

Berezka V. V., Baronin S. A., Bredikhin V. V., Zobnev A. V.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Stability Study of a Neuro-Fuzzy Output System Based on Ratio Area Method.....	70
---	-----------

Milostnaya N. A.

Chebyshev Alternance when Approximating Initial Conditions of the Inverse Cauchy Problem	86
---	-----------

Loktionov A. P.

Simulation of Control System of Executive Links of Rehabilitation Exoskeleton Considering Spasticity Effect	103
--	------------

Jatsun S. F., Malchikov A. V., Postolny A. A., Yatsun A. S.

Choice of Kinematic Structure of Modular Robotic System Depending on the Type of Motion Surface.....	120
---	------------

Saveliev A. I., Blinov D. V., Erashov A. A.

Choosing Methodology of How to Manage Distributed Information Systems under Conditions of High Dynamics of Network Infrastructure	136
--	------------

Klimenko A. B.

Two-step Approach to Corrosion Detection of Metal Structures Using Convolutional Neural Networks When Inspecting Industrial Facilities	152
---	------------

Rusakov K. D., Chekhov A. V.

Evaluation of High-Speed Link Parameters for Highly Reliable Reconfigurable Systems Based on S-Parameters and BER	167
--	------------

Orda-Zhigulina M. V.

Исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия

Ж.В. Еремеева¹ ✉, Е.В. Агеев², Г.Х. Шарипзянова³, Ю.Ю. Капланский¹,
Н.М. Ниткин³, А.С. Ахметов¹, В.Л. Орлов³, А.А. Саенко¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Российская Федерация

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

³ Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Провести исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия.

Методы. Был проведен синтез сложных соединений гафната европия Eu_2HfO_5 и гафната церия Ce_2HfO_5 из оксидов европия, гафната и церия при помощи механохимического синтеза в планетарно-центробежной мельнице. Частота вращения диска составляла 600 – 900 об/мин и частота вращения барабанов 1000 – 1800 об/мин, при соотношении размольных тел к массе порошковой шихты (35 – 45): 1, в атмосфере аргона. Синтез продолжался 5 – 120 мин.

Результаты. Был проведен рентгенофазовый анализ, показавший образование Eu_2HfO_5 и Ce_2HfO_5 ; а также исследование морфологии частиц полученных порошков, их технологических свойств, гранулометрического состава, формуемости и уплотняемости, а также процесса их консолидации.

Заключение. На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия, был выявлен оптимальный режим синтеза гафнатов церия и европия. Методом механоактивации были получены порошок гафната церия с размерами частиц 30-100 нм, порошок гафната европия с размерами частиц 40-70 нм. При помощи методов РФА, ПЭМ и СЭМ была изучена смешанная структура полученных механосинтезом порошков гафнатов лантаноидов. Были определены технологические свойства механосинтезированных порошков гафната церия и европия, а так же изучена их уплотняемость и формуемость после прессования и спекания. Образцы из порошка гафната европия имеют относительную плотность больше, чем образцы из порошка гафната церия после консолидации при температурах 900-1200 °С и времени изотермической выдержки от 30 до 120 мин. Исследования микротвердости образцов гафнатов лантаноидов после спекания показали, что образцы гафната европия имеют твердость больше, чем образцы гафната церия.

© Еремеева Ж.В., Агеев Е.В., Шарипзянова Г.Х., Капланский Ю.Ю., Ниткин Н.М., Ахметов А.С., Орлов В.Л.,
Саенко А.А., 2021

Ключевые слова: сложные оксиды лантаноидов; гафнат европия; гафнат церия; механохимический синтез; оксид гафния; оксид европия; оксид церия; формование; консолидация; физико-химические свойства; структура гафнатов лантаноидов.

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

Финансирование: Работа проводилась в рамках гранта РФФИ (номер гранта 19-08-00273).

Для цитирования: Исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия / Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев, Г.Х. Шарипзянова, Ю.Ю. Капланский, Н.М. Ниткин, А.С. Ахметов, В.Л. Орлов, А.А. Саенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 8-26. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-8-26>.

Поступила в редакцию 20.07.2021

Подписана в печать 16.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Investigation of Molding Process and Consolidation of Preforms from Mechanically Synthesized Powders of Europium and Cerium Hafnates

Zhanna V. Eremeeva ¹ ✉, Evgeny V. Ageev ², Gyuzel H. Sharipzyanova ³,
Yuriy Yu. Kaplansky ¹, Nikolay M. Nitkin ³, Amangeldy S. Akhmetov ¹,
Vadim L. Orlov ³, Anna A. Saenko ¹

¹ National Research Technological University "MISIS"
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russian Federation

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

³ Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. To study the process of molding and consolidation of preforms from mechanically synthesized powders of europium and cerium hafnates.

Methods. Complex compounds of europium hafnate Eu_2HfO_5 and cerium hafnate Ce_2HfO_5 have been synthesized from europium, hafnate and cerium oxides using mechanochemical synthesis in a planetary centrifugal mill. The rotational speed of the disk was 600 - 900 rpm and the rotational speed of the drums is 1000 - 1800 rpm, with the ratio of grinding bodies to the mass of the powder charge (35 - 45): 1, in an argon atmosphere. Synthesis lasts 5 - 120 minutes.

Results. An X-ray phase analysis has been performed showing the formation of Eu_2HfO_5 and Ce_2HfO_5 ; as well as the study of the morphology of particles of the obtained powders, their technological properties, granulometric composition, formability and compaction, as well as the process of their consolidation.

Conclusion. On the basis of the experimental studies aimed at studying the molding process and consolidation of preforms from mechanically synthesized powders of europium and cerium hafnates, it has been revealed the optimal mode of synthesis of cerium and europium hafnates. We have obtained a cerium hafnate powder with a particle size of 30-100 nm and a europium hafnate powder with a particle size of 40-70 nm by the method of mechanical

activation. Using X-ray phase analysis, TEM and SEM methods, the mixed structure of lanthanide hafnates powders obtained by mechanosynthesis have been studied. The technological properties of mechanically synthesized powders of cerium and europium hafnate, as well as, their compaction and formability after pressing and sintering have been determined and studied. Samples from europium hafnate powder have a relative density higher than samples from cerium hafnate powder after consolidation at temperatures of 900-1200 °C and isothermal holding time from 30 to 120 min. A study of the microhardness of lanthanide hafnate samples after sintering has shown that europium hafnate samples have greater hardness than cerium hafnate samples.

Keywords: complex oxides of lanthanides; europium hafnate; cerium hafnate; mechanochemical synthesis; hafnium oxide; europium oxide; cerium oxide; molding; consolidation; physicochemical properties; structure of lanthanide hafnates.

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

Funding: The work has been carried out within the framework of the RFBR grant (grant number 19-08-00273).

For citation: Ereemeeva Z. V., Ageev E. V., Sharipzyanova G. H., Kaplansky Y. Yu., Nitkin N. M., Akhmetov A. S., Orlov V. L., Saenko A. A. Investigation of Molding Process and Consolidation of Preforms from Mechanically Synthesized Powders of Europium and Cerium Hafnates. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 8-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-8-26>.

Received 20.07.2021

Accepted 16.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

Современная химическая промышленность, а также атомная промышленность ставят перед материаловедением задачу по разработке и внедрению новых эффективных материалов, отвечающих современным требованиям данных отраслей. Сложные оксидные соединения гафнатов, цирконатов, гранатов отличаются уникальными химическими свойствами, и имеют повышенные прочностные и эксплуатационные свойства. Гафнаты лантаноидов имеют отличительную особенность по свойствам поглощающих материалов, так как содержат ядра Hf и Dy или Eu или La, которые характеризуются высокими сечениями поглощения [1-3]. Необходимо отметить, что можно, изменяя соотношение содержания гафния, диспрозия, лантана, европия в поглощающем мате-

риале, влиять на физическую эффективность поглощения. В промышленной практике проводят высокотемпературное сплавление их оксидов в вакуумной индукционной печи, затем следует дробление полученного слитка, его измельчение, затем фракционирование, последующее прессование и твердофазное спекание.

В ряде последних, как отечественных, так и зарубежных работ [4-6] дано описание технологий синтеза сложных оксидных соединений методом механохимии с использованием планетарно-центробежных мельниц. Как показано в источниках [7, 8] полученные механохимией порошки сложных оксидных соединений характеризуются высокой дисперсностью, средний размер таких порошков не превышает 200 нм, данные порошки сильно агломерируются и не обладают текучестью. Следует отметить,

что одной из основных задач химии твердого тела стоит решение проблемы интенсификации твердофазного синтеза сложнооксидных соединений. Поэтому в настоящее время идет ускоренное развитие технологий механосинтеза.

Целью настоящей работы являлось проведение исследования процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия.

Материалы и методы

Для проведения синтеза сложных оксидных соединений гафната европия Eu_2HfO_5 и гафнтата церия Ce_2HfO_5 в работе использовались порошки оксида европия, оксида гафния и оксида церия класса ХЧ (химически чистые), которые брались в стехиометрическом соотношении. Порошок оксида европия содержал посторонние примеси не более 0,4 мас.%. Насыпная плотность порошка оксида европия составляет 0,95 г/см³. Средний размер частиц данного порошка от 1 до 3 мкм, форма порошка оксида европия осколочная, данный порошок не течет. Порошок HfO_2 содержит посторонних примесей не более 0,4 мас.%. Его насыпная плотность – 1,87 г/см³. Порошок HfO_2 имеет большой разброс по размерам от 200 до 400 мкм. Порошок HfO_2 не течет и имеет пластинчатую форму. Порошок CeO_2 содержит примесей до 0,2 мас.%, форма частиц данного порошка игольчатая, насыпная плотность порошка CeO_2 составляет 0,82 г/см³, размер частиц от 2 мкм до

5 мкм, порошок CeO_2 агломерирован, он не обладает текучестью.

С целью получения порошков гафната церия и гафната европия в работе проводился механохимический синтез с использованием планетарно-центробежной мельницы ПЦМ «Активатор -2с» производства ООО «Завод Химического Машиностроения». Исходя из проведенных предварительных исследований по параметрам механохимического синтеза в работе были выбраны следующие режимы: частота вращения диска 600-900 об/мин; частота вращения барабанов 1000 ... 1800 об/мин; соотношение массы размольных тел к массе порошковой шихты - (35-45): 1; давление аргона в барабанах составляло 300-500 КПа; продолжительность синтеза 5-120 минут.

После проведения синтезов был проведен рентгенофазовый анализ, который показал 100 % превращение в соединение Eu_2HfO_5 и в соединение Ce_2HfO_5 . Было проведено исследование морфологии полученных порошков и их технологических свойств, также была изучена формуемость и уплотняемость механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия, а также проанализирован процесс их консолидации. Уплотняемость порошков определялась согласно ГОСТ 25280-90. Механосинтезированные порошки гафнатов европия и церия формовали на автоматическом гидравлическом прессе Fontijne Grotnes B. V. Lab Econ 600 по двухсторонней схеме приложения нагрузки. Диаметр матрицы составлял 11 мм, давление от

100 до 600 МПа с шагом в 100-200 МПа, масса навески составляла 0,5 г.

Твердофазное спекание полученных формовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия осуществляли в муфельной электропечи марки СШОЛ 1.1,6/12-МЗ (Россия) при выдержках в течение 30, 60 и 120 мин, при температурах 900, 1000, 1100 и 1200°C. Охлаждение консолидированных образцов проводили с печью.

Плотность рассчитывали исходя из фактических геометрических размеров формовок, их массы и аддитивной плотности порошков. Общую пористость определяли по ГОСТ 18898 – 89¹. Твердость определяли по методу Роквелла согласно ГОСТ 9013 – 59².

На универсальном лазерном приборе измерения размера частиц модели FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec-plus (Германия) был осуществлен контроль гранулометрического состава механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия. Структуру и свойства механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия и спеченных заготовок из данных порошков изучался на сканирующем электронном микроскопе S – 3400N, Рентгенофазовый анализ проводили на оборудовании ДРОН – 2. Просвечивающую электронную микро-

скопию делали на многоцелевом аналитическом электронном микроскопе JEM-2300.

Результаты и их обсуждение

В предварительно проведенных исследованиях был установлен наиболее рациональный режим механохимического синтеза гафнатов лантаноидов: частота вращения водила и барабанов – 800 и 1200 об/мин, соответственно; соотношение масс размольных тел и обрабатываемого порошка – 40: 1, продолжительность обработки – 30-60 мин.

После проведения механосинтеза был исследован гранулометрический состав полученных порошков гафната европия и гафната церия. Данные результаты представлены на рис. 1.

С помощью электронного микроскопа была изучена их морфология. Изображения частиц порошков гафната европия и гафната церия представлены на рис. 2.

По результатам данных исследований выявлено, что механосинтезированный порошок гафната европия представляет собой нанокристаллические частицы неравноосной формы размерами 40-70 нм, объединенные в агломераты 300-400 нм.

Соответственно у механосинтезированного порошка гафната церия средний размер частиц составляет 30-100 нм, Порошок также агломерируется, размер агломератов колеблется от 200 до 400 нм.

¹ ГОСТ 18898 – 89. Изделия порошковые. Методы определения плотности содержания масла и пористости. Введ. 1989.20.12. М., 1989. 10 с.

² ГОСТ 9013 – 59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Введ. 1959.04.02. М., 1959. 6 с.

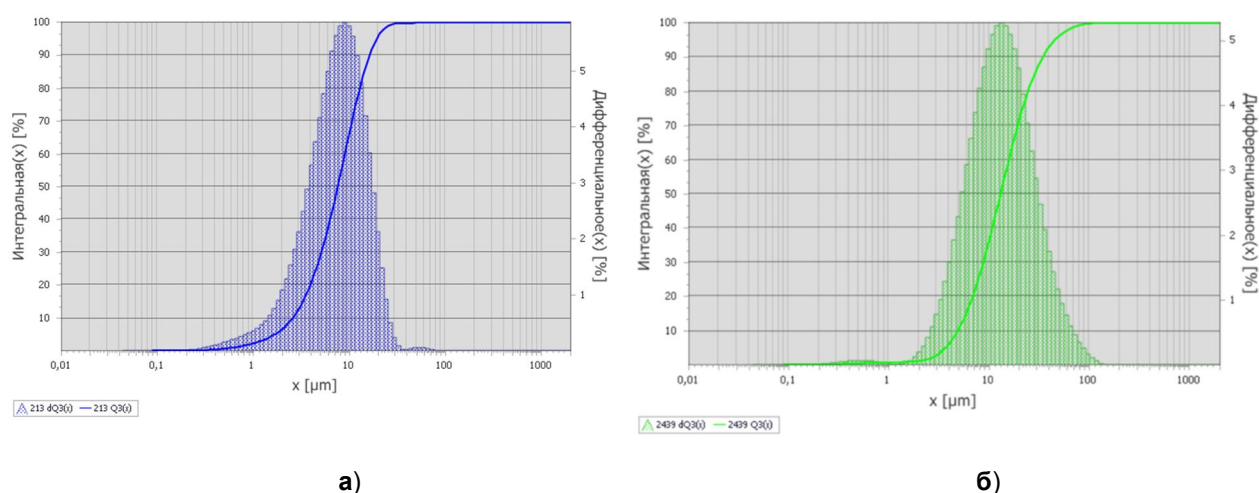


Рис. 1. Гистограммы распределения по размерам частиц порошков: **а** – гафната европия; **б** – гафната лантана, полученных механосинтезом смесей оксидов европия и гафния и смесей оксидов лантана и гафния соответственно

Fig. 1. Histograms of the particle size distribution of powders: **a** – europium hafnate; **b** – lanthanum hafnate obtained by mechanosynthesis of mixtures of europium and hafnium oxides and mixtures of lanthanum and hafnium oxides, respectively

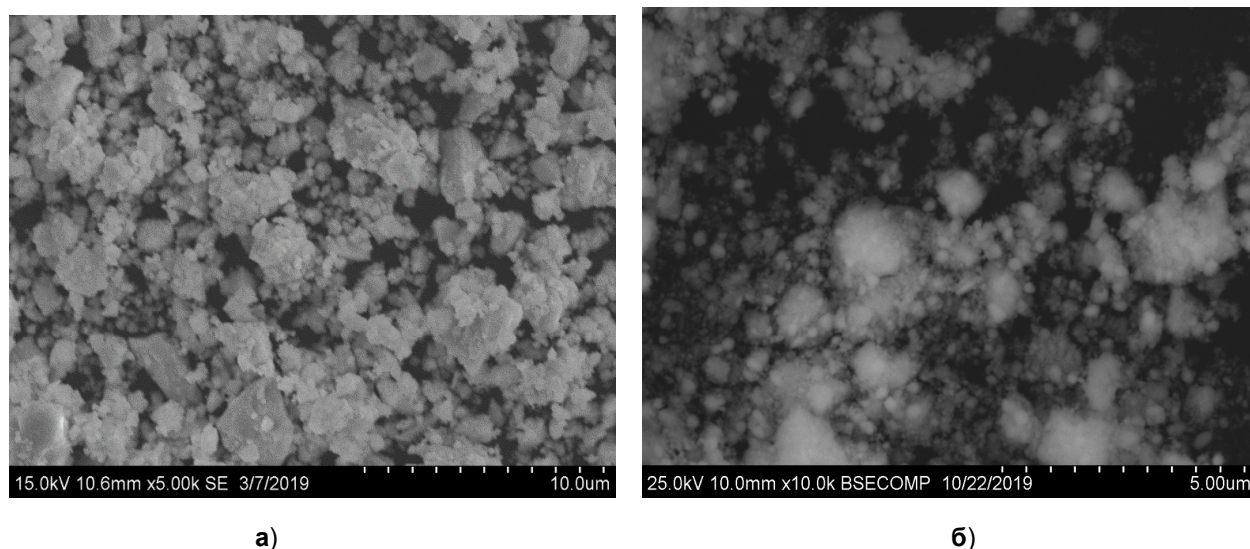


Рис. 2. СЭМ-изображение порошка гафната: **а** – европия; **б** – церия

Fig. 2. SEM image of hafnate powder: **a** – europium; **b** – cerium

Такое различие в размерах получаемых порошков можно объяснить тем, что исходные порошки для синтеза гафната европия имели размеры частиц меньше, чем исходные порошки для механосинтеза гафната церия.

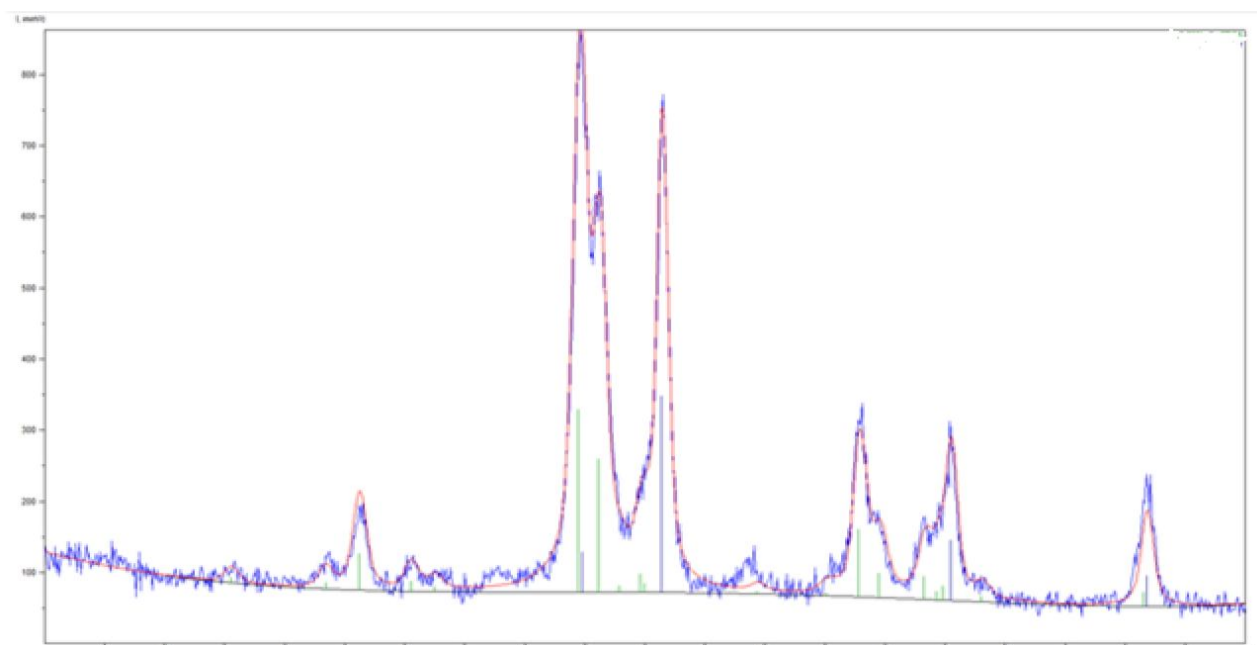
В работе были определены технологические свойства механосинтезированных порошков гафната церия и гафната европия, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства порошков гафната европия и гафната церия полученных механосинтезом**Table 1.** Properties of europium hafnate and cerium hafnate powders obtained by mechanosynthesis

Материал / Material	Текущность, с / Fluidity, seconds	Насыпная плотность, г/см ³ / Bulk density, g/cm ³	Удельная по- верхность, м ² /г / Specific surface area, m ² /g	Ср. размер агломератов, нм / Average size of agglom- erates, nm	Размер частиц, нм / Particle size, nm
Eu ₂ HfO ₅ механосинтез	не течет	1,75 ... 1,77	18 ... 26	300 ... 400	40 ... 70
Ce ₂ HfO ₅ механосинтез	не течет	1,80 ... 1,85	15 ... 23	200 ... 400	30 ... 100

Данные с рентгенофазового анализа показали, что полное превращение исходных оксидов лантаноидов в нанокристаллический сложный оксид происходит при механохимическом синтезе свыше 30 минут (рис. 3 и 4). При меха-

ноактивации гафната европия и гафната церия в течение меньшего времени наблюдается непрореагировавшие либо оксид европия, либо оксид церия соответственно.

**Рис. 3.** Рентгенофазовый анализ смеси CeO₂-HfO₂ после МХО при продолжительности обработки 30 мин**Fig. 3.** X-ray phase analysis of the CeO₂-HfO₂ mixture after MCO at the treatment duration 30 min

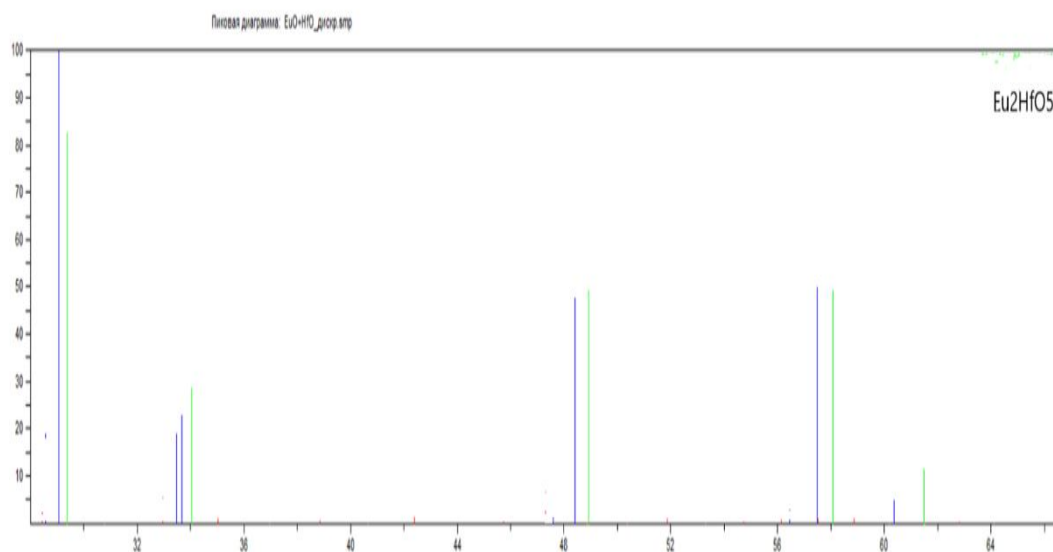


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ смеси $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ после МХО при продолжительности обработки 40 мин

Fig. 4. X-ray phase analysis of the $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ mixture after MCO at a treatment duration of 40 min

Данные исследования энергодисперсионного анализа элементного состава для отдельной частицы гафната церия и гафната европия представлены на рис. 5 и показывают, что элементы содержатся

практически в стехиометрическом соотношении по всему объему частицы после механохимической обработки в течение 30 минут [7].

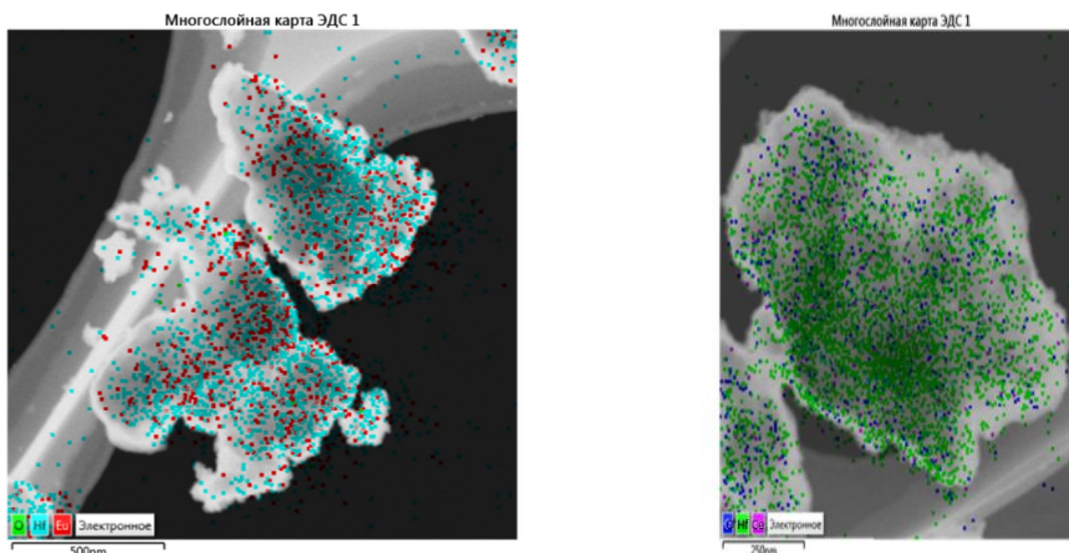
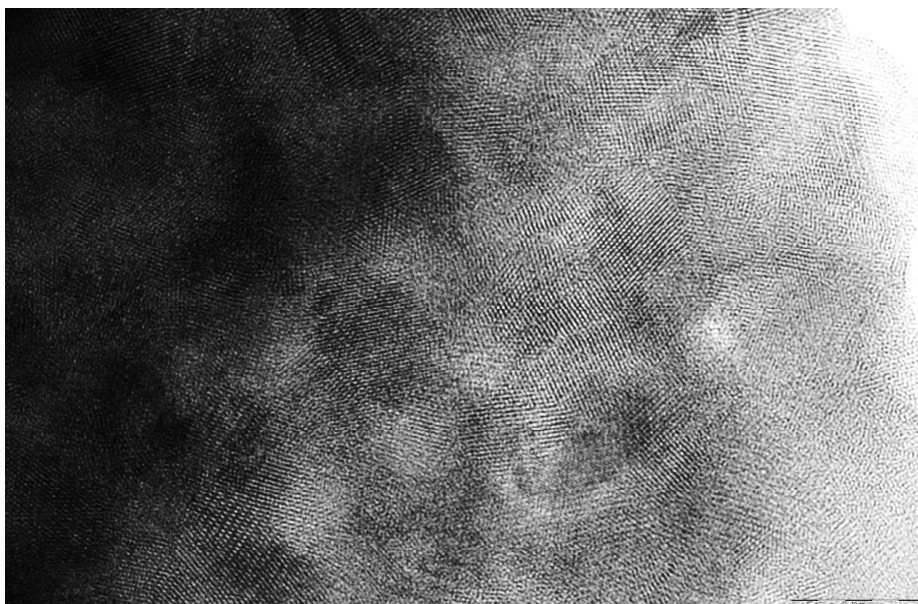


Рис. 5. ПЭМ–изображение частицы порошков Eu_2HfO_5 и Ce_2HfO_5 , соответственно после МХО при продолжительности обработки 30 мин

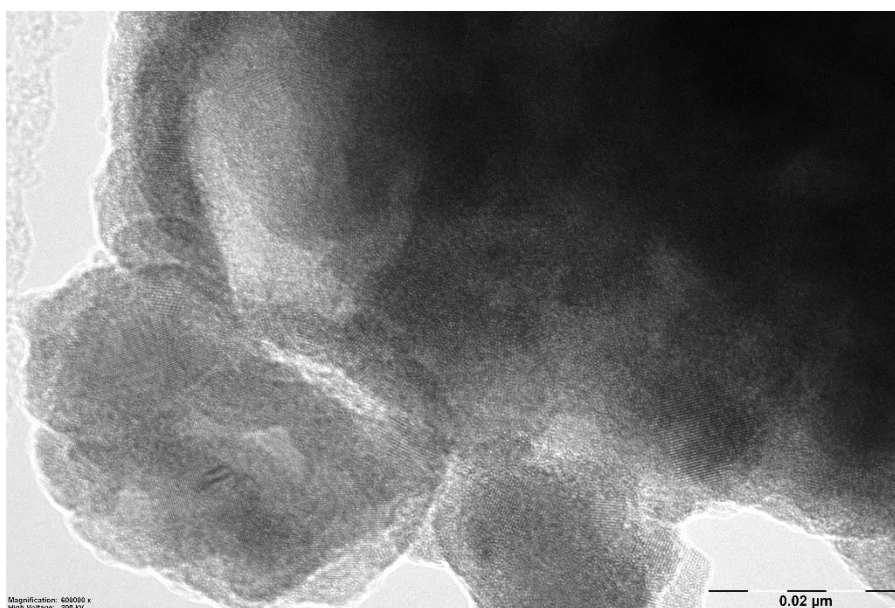
Fig. 5. TEM-image of a particle of Eu_2HfO_5 and Ce_2HfO_5 powders, respectively, after MHO at a processing time of 30 min

Исследования механосинтезированных порошков гафната европия и гафната церия с применением метода ПЭМ выявили смешанную структуру: типичную полосчатую структуру из атомных

плоскостей, которая характерна для кристаллического состояния, и структуру с разупорядоченным состоянием атомов, близкую к аморфной (рис. 6) [8].



a)



б)

Рис. 6. ПЭМ-изображение: **а** – частицы Eu_2HfO_5 , полученной механохимическим способом;

б – агломерата частиц гафната церия, полученного механосинтезом

Fig. 6. TEM image: **a** – Eu_2HfO_5 particles obtained by mechanochemical method;

б – agglomerate of cerium hafnate particles obtained by mechanosynthesis

Была изучена уплотняемость механосинтезированных порошков гафнатов европия и гафната церия, после формования были определены их размеры, вес,

плотность, относительная плотность и построены зависимости относительной плотности от давления прессования, которые представлены на рис. 7.

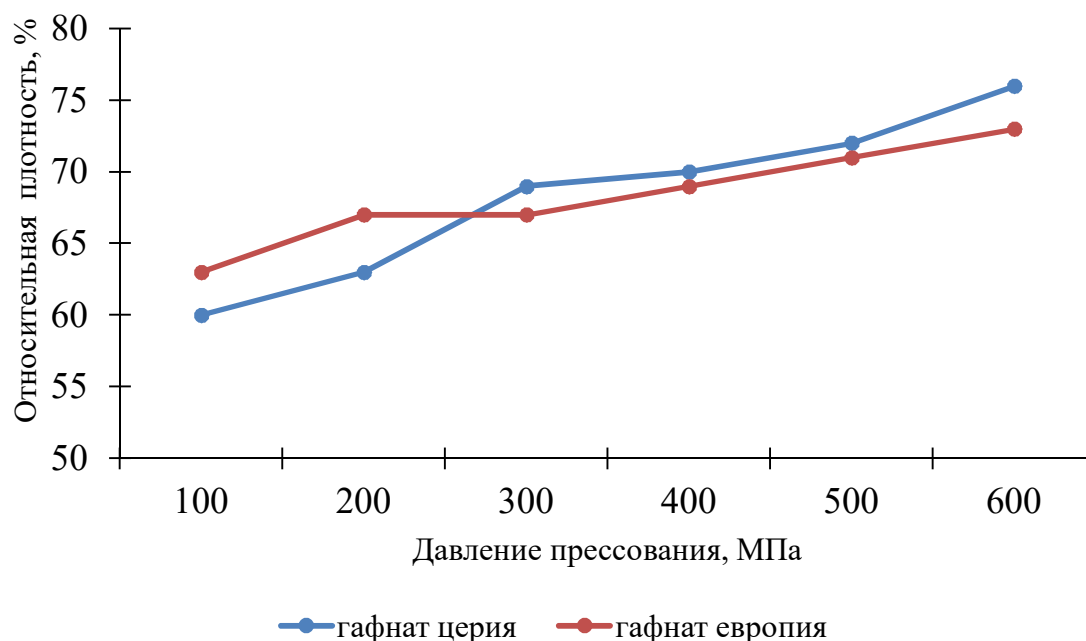


Рис. 7. Зависимость относительной плотности гафнатов европия и церия от давления прессования

Fig. 7. Dependence on the density of europium and cerium hafnates on the pressing pressure

Из представленных на рис. 7 зависимостей относительной плотности следует, что гафнат европия и гафнат церия хорошо уплотняются во всем рассматриваемом диапазоне давлений 200-600 МПа. Оба сложных оксида лантаноида имеют хорошую формуемость, так как даже при малых давлениях от 10 до 50 МПа, они сохраняют форму без осыпания кромок и не разрушаются.

Были проведены исследования по изучению процесса консолидации формовок из порошков гафнатов европия и церия. На рис. 8 представлена зависимость относительной плотности образцов гафнатов церия и европия от давления

формования, спекание данных образцов проводили при температуре 1200 °С в течение 60 минут. Как следует из представленных на рис. 8 зависимостей, наибольшей относительной плотностью 86 % обладают образцы из гафната европия, сформованные при давлении 600 МПа, когда как образцы из гафната лантана имеют относительную плотность после спекания 70 % при давлении формования 600 МПа. Образцы гафната церия, которые были сформованы при аналогичном давлении, имеют относительную плотность 72 %, что говорит об активизации процесса массопереноса при спекании образцов гаф-

ната европия [9], которые связаны с формой и размером частиц данного порошка. Было изучено влияние продолжительности процесса консолидации на относительную плотность образцов при

проведении спекания при температуре 1200 °С, образцы гафната европия и гафната церия были сформованы при давлении 600 МПа. Полученные зависимости представлены на рис. 9.

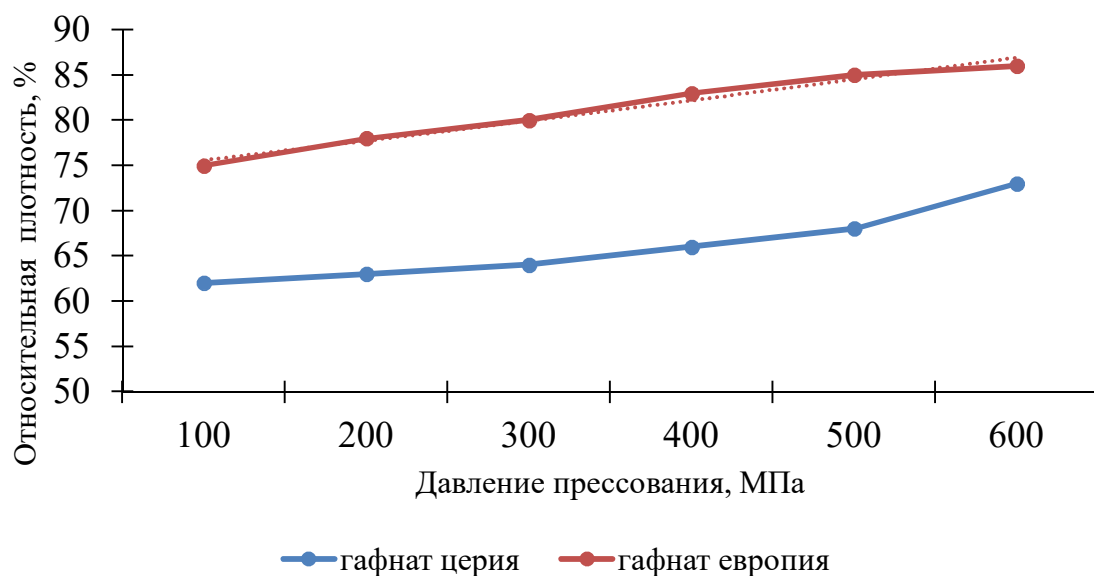


Рис. 8. Зависимость относительной плотности гафнатов европия и церия от давления прессования после спекания

Fig. 8. Dependence on the density of europium and cerium hafnates on the pressing pressure after sintering

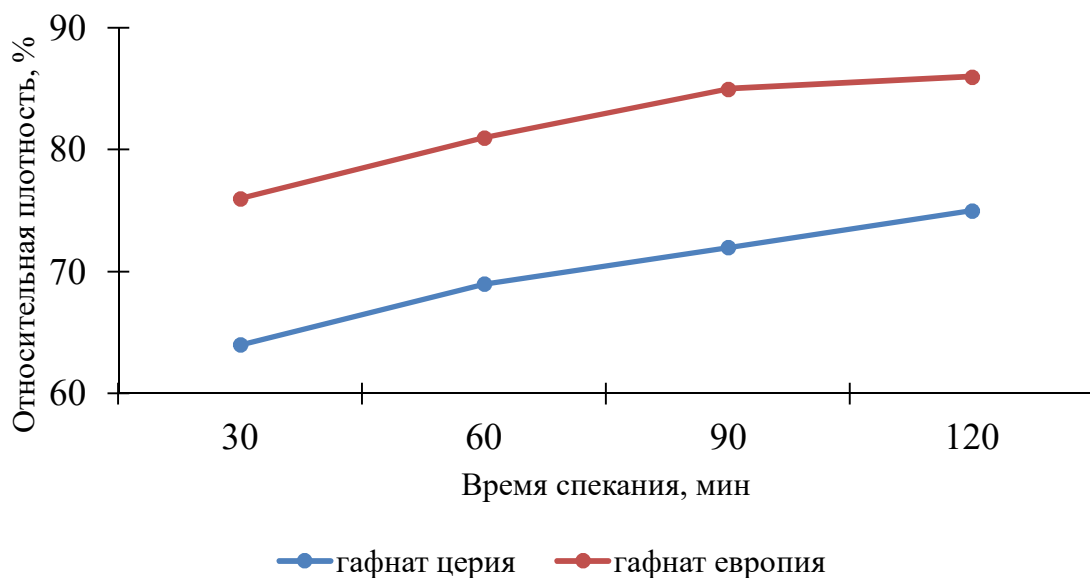


Рис. 9. Зависимость относительной плотности образцов из гафната европия и гафната церия от времени спекания

Fig. 9. Dependence of the relative density of samples from europium hafnate and cerium hafnate on the sintering time

Как следует из зависимостей относительной плотности от времени спекания относительная плотность 85-86% достигается на образцах из гафната европия при спекании в течение 90-120 минут, а относительная плотность 72-75% достигается у образцов из гафната церия при спекании в течение 120 минут. Такая разница в относительной плотности можно объяснить меньшим

размером частиц гафната европия и их большей диффузионной подвижностью.

Было изучено влияние температуры процесса спекания на относительную плотность образцов при проведении процесса консолидации в течение 60 минут, образцы гафната европия и гафната церия были сформованы при давлении 600 МПа. Полученные зависимости представлены на рис. 10.

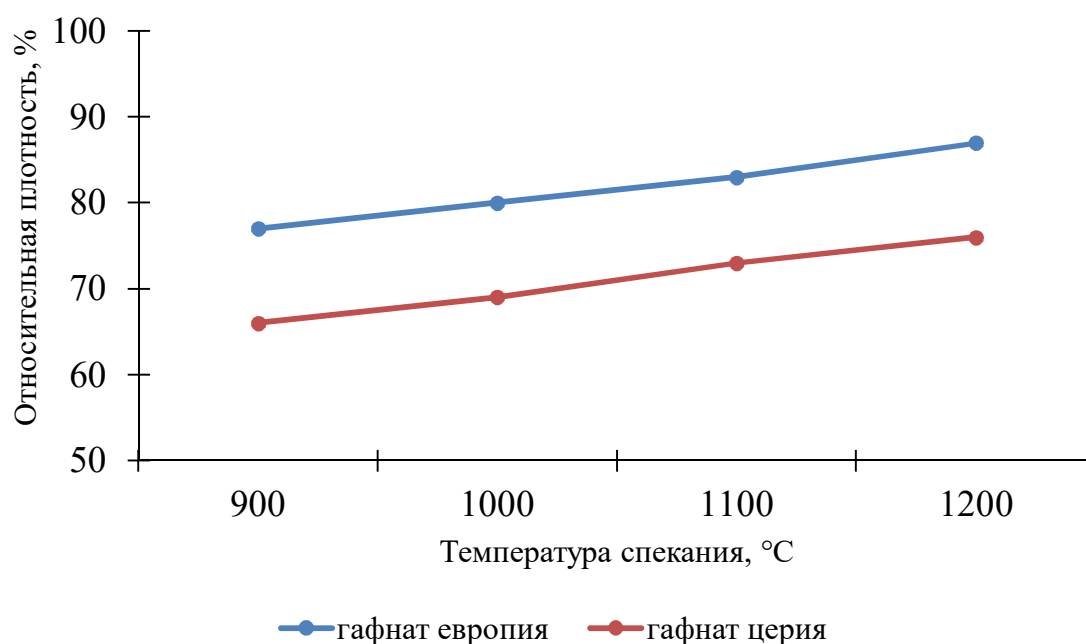


Рис. 10. Зависимость относительной плотности образцов из гафната европия и гафната церия от температуры спекания

Fig. 10. Dependence of the relative density of samples from europium hafnate and cerium hafnate on the sintering temperature

Как следует из зависимостей относительной плотности от температуры спекания относительная плотность 87 % достигается на образцах из гафната европия при температуре спекания 1200 °C, а относительная плотность 75-76 % достигается у образцов из гафната церия при этой же температуре спекания. Такая разница в относительной плотности

большей диффузионной активностью механосинтезированного порошка гафната европия.

После спекания в муфельной печи образцы исследовали при помощи метода СЭМ. Результаты исследования образцов гафната церия представлены на рис. 11, гафната европия – на рис. 12.

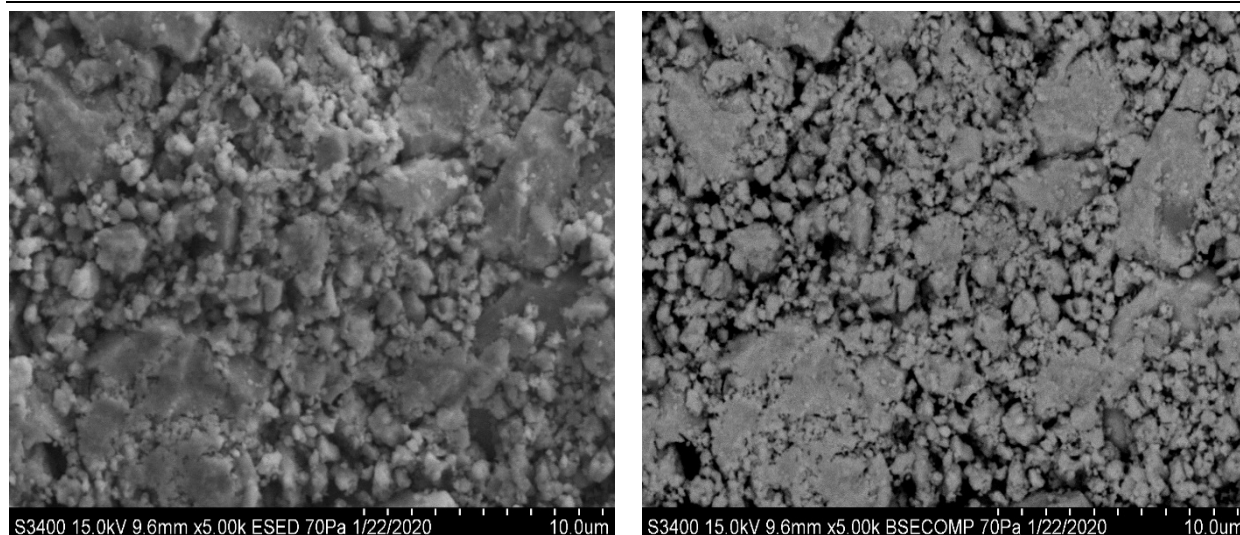


Рис. 11. СЭМ-изображение порошка гафната церия после спекания в муфельной печи

Fig. 11. SEM-image of cerium hafnate powder after sintering in a muffle furnace

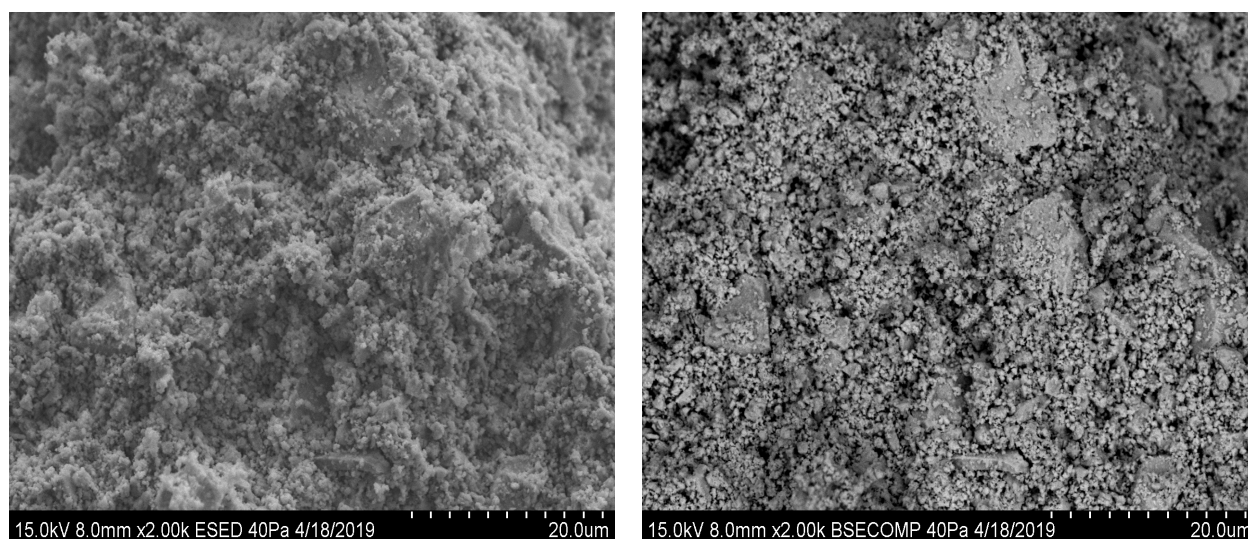


Рис. 12. СЭМ-изображение порошка гафната европия после спекания в муфельной печи

Fig. 12. SEM-image of europium hafnate powder after sintering in a muffle furnace

СЭМ – изображения порошка гафната церия после спекания в муфельной печи показывает заметный рост зерна до 10 мкм, а так же наличие мелких пор до 2-3 мкм. Результаты исследований гафната европия показывают отсутствие пор и размер зерна около 1 мкм. Результаты с растрового электронного микроскопа подтверждают график зави-

симости относительной плотности гафнатов лантаноидов от давления прессования после спекания.

Результаты исследования твердости порошков гафнатов лантаноидов, сформированных при давлениях 400, 500, 600 МПа и спеченных при температуре 1200 °С, представлены на рис. 13.

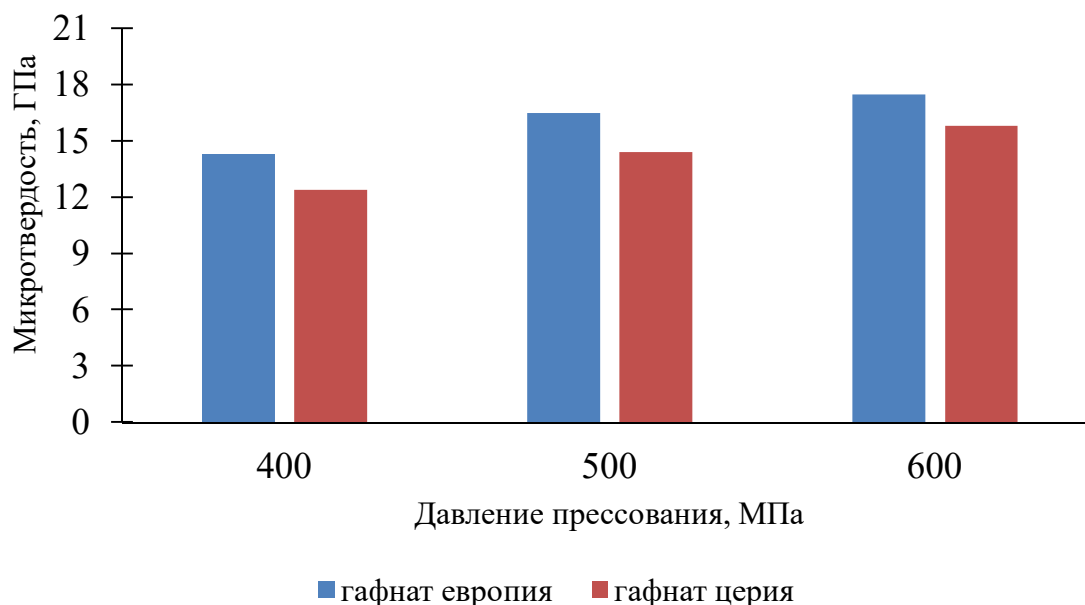


Рис. 13. Микротвердость заготовок из механосинтезированных порошков гафната церия и гафната европия

Fig. 13. Microhardness of billets from mechanosynthesized cerium hafnate and europium hafnate powders

Как показано на диаграмме, самой большой микротвердостью обладают образцы гафната европия при давлении в 600 МПа. Это связано с тем, что спрессованные образцы гафната европия после спекания имеют самую большую относительную плотность, мелкие равномерные поры и однородную мелкозернистую структуру [10-17]. Проведенные исследования подтверждаются сопоставимостью с трудами в этом направлении других авторов [18-22].

Выводы

1. В ходе работы был выявлен оптимальный режим синтеза гафнатов церия и европия. Методом механоактивации были получены порошок гафната церия с размерами частиц 30-100 нм, порошок гафната европия с размерами частиц 40-70 нм.

2. При помощи методов РФА, ПЭМ и СЭМ была изучена смешанная структура полученных механосинтезом порошков гафнатов лантаноидов.

3. Были определены технологические свойства механосинтезированных порошков гафната церия и европия, а так же изучена их уплотняемость и формуемость после прессования и спекания. Образцы из порошка гафната европия имеют относительную плотность больше, чем образцы из порошка гафната церия после консолидации при температурах 900-1200 °С и времени изотермической выдержки от 30 до 120 мин.

4. Исследование микротвердости образцов гафнатов лантаноидов после спекания показали, что образцы гафната европия имеют твердость больше, чем образцы гафната церия.

Список литературы

1. Сравнительные характеристики поглощающих кластерных сборок ВВЭР-1000 и PWR / В.Д. Рисованный, Е.Е. Варлашова, С.Р. Фридман, В.Б. Пономаренко, А.В. Щеглов // Атомная энергия. 1998. Т. 84. Вып. 6. С. 508–513.
2. Анализ разработок конструкций и материалов ПЭЛов ПС СУЗ повышенной работоспособности / Н.Н. Белаш, А.В. Куштым, В.Р. Татаринцов, И.А. Чернов // Ядерные и радиационные технологии. 2007. Т. 7. №. 3-4. С. 18-28.
3. Госсет Д. 15 – Материалы поглотителя для реакторов поколения IV // Конструкционные материалы для ядерных реакторов поколения IV. ElsevierLtd. 2017. С. 533-567.
4. Халамейда С.В. Некоторые новые подходы при механохимическом синтезе нанодисперсного титаната бария // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2009. Т. 7. № 3. С. 911–918.
5. Механохимический синтез алюминатов кальция / В.Ю. Прокофьев, А.П. Ильин, Ю.Г. Широков, В.И. Ягодкин // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 1995. Т.38. №6. С. 28-32.
6. Avvakumov E. G., Senna M., Kosova N. V. Soft mechanochemical synthesis: a basis for new chemical technologies. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2001. 208 p.
7. Болдырев В.В. Механохимический синтез в неорганической химии // Сб. СО РАН / под ред. Е.Г. Аввакумова. Новосибирск: Наука, 1991. С. 5–32.
8. Разработка метода получения оксида цинка с применением механохимического синтеза / А.А. Ильин, А.Н. Железнова, А.П. Ильин, Ю.М. Комаров // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. №. 1. С. 82-85.
9. Mechanochemical synthesis of copper oxides and salts using the gasliquid mediums / A. A. Ilyin, N.N.Smironov, R.N. Rumyantsev, A. M. Efremov, A.P. Ilyin // Scientific Israel-Technological Advantages. 2015. V.17. № 3-4. P. 196-208
10. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. М.: Техносфера, 2004. 256 с.
11. Особенности структуры и теплофизические свойства керамических сложных оксидов в системе $Dy_2O_3 - HfO_2$ / В. В. Попов, А. П. Менушенков, Я. В. Зубавичус, С.А. Коровин, Е.А. Фортальнова [и др.] // Стекло и керамика. 2016. №. 2. С. 11-17.
12. Красноруцкий В.С. [и др.]. Горячее прессование гранул диспрозия гафната и титаната // Химреагент. 2012. Т. 50, № 11. С. 708–713.
13. Юнг С., Ким С., Ли С. Исследования синтеза и спекания Dy_2TiO_5 , полученного химическим процессом на полимерном носителе // J. Nucl. Mater. 2006. Т. 354. С. 137–142.
14. Panneerselvam G. et al. Теплофизические измерения титанатов диспрозия и гадолиния // J. Nucl. Mater. 2004. Т. 327. С. 220–225.

15. Results of SM reactor tests of dysprosium hafnate / V. G. Toporova, V. V. Pimenov, V. D. Risovanyi, A. V. Zakharov // *Atomic Energy*. 2011. 110(4). P. 259–264.
16. Eremeeva Z.V., Kaplanskiy Y.Y., Vorotylo S. et al. Fabrication of Nanodispersed Powder of Dysprosium Hafnate Dy_2HfO_5 by Mechanochemical Method // *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2021. 12. P. 1042–1046.
17. Cepeda-Sánchez, N. M., Fuentes, A. F., López-Cota, F. A., Rodríguez-Reyes, M., & Díaz-Guillén, J. A. Mechanochemical synthesis and electrical properties of $Gd_2Hf_{2-x}Zr_xO_7$ solid electrolytes for their use in SOFC's // *Journal of Applied Electrochemistry*, 2015. 45(11). P. 1231–1237.
18. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012. № 1. С. 19–22.
19. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.
20. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 5-1 (38). С. 138-144.
21. Получение твердосплавных изделий холодным изостатическим прессованием электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, П.И. Бурак, Е.В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 5 (50). С. 116-125.
22. 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.

References

1. Risovany V.D., Varlashova E.E., Friedman S.R., Ponomarenko V.B., Shcheglov A.V. *Sravnitel'nye kharakteristiki pogloshchayushchikh klasternykh sborok VVER-1000 i PWR* [Comparative characteristics of absorbing cluster assemblies VVER-1000 and PWR]. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 1998, vol. 84, is. 6, pp. 508-513.
2. Belash N.N., Kushtym A.V., Tatarinov V.R., Chernov I.A. *Analiz razrabotok konstruktсии i materialov PELov PS SUZ povyshennoi ra-botosposobnosti* [Analysis of the development of structures and materials of PELS PS SUZ increased efficiency]. *Yadernye i radiatsionnye tekhnologii = Nuclear and Radiation Technologies*, 2007, vol. 7, no. 3-4, pp. 18-28.

3. Gosset D. [15 - Absorber materials for generation IV reactors. Structural materials for generation IV nuclear reactors]. *Konstruktsionnye materialy dlya yadernykh reaktorov pokoleniya IV. ElsevierLtd = ElsevierLtd*, 2017, pp. 533-567.
4. Halameida S.V. Nekotorye novye podkhody pri mekhanokhimicheskom sinteze nanodispersnogo titanata bariya [Some new approaches in the mechanochemical synthesis of nanodisperse barium titanate]. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 911-918.
5. Prokofiev V.Yu., Ilyin A.P., Shirokov Yu.G., Yagodkin V.I. Mekhanokhimicheskii sintez alyuminatov kal'tsiya [Mechanochemical synthesis of calcium aluminates]. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Izvestiya VUZov, Chemistry and Chemical Technology*, 1995. vol.38, no. 6, pp. 28-32.
6. Avvakumov E. G., Senna M., Kosova N. V. Soft mechanochemical synthesis: a basis for new chemical technologies. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2001. 208 p.
7. Boldyrev V.V. *Mekhanokhimicheskii sintez v neorganicheskoi khimii*. Sb. SO RAN [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry]; ed. by E.G. Avvakumov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, pp. 5-32.
8. Ilyin A.A., Zheleznova A.N., Ilyin A.P., Komarov Yu.M. Razrabotka metoda polucheniya oksida tsinka s primeneniem mekhanokhimicheskogo sinteza [Development of a method for obtaining zinc oxide using mechanochemical synthesis]. *Izvestiya Vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Izvestiya Vuzov. Chemistry and Chemical Technology*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 82-85.
9. Ilyin A. A., Smirnov N.N., Rumyantsev R.N., Efremov A. M., Ilyin A.P. Mechanochemical synthesis of copper oxides and salts using the gasliquid mediums. *Scientific Israel-Technological Advantages*, 2015, vol.17, no. 3-4, pp. 196-208.
10. Shindo D., Oikawa T. *Analiticheskaya prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya* [Analytical transmission electron microscopy]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 256 p.
11. Popov V. V., Menushenkov A. P., Zubavichus Ya. V., Korovin S.A., Fortalnova E.A., etc. Osobennosti struktury i teplofizicheskie svoistva keramicheskikh slozhnykh oksidov v sisteme Dy₂O₃ - HfO₂ [Structural features and thermophysical properties of ceramic complex oxides in the Dy₂O₃ - HfO₂ system]. *Steklo i keramika = Glass and Ceramics*. 2016, no. 2, pp. 11-17.
12. Krasnorutsky V.S. and others. Goryachee pressovanie granul disproziya gafnata i titanata [Hot pressing of granules of dysprosium hafnate and titanate]. *Khimreagent = Chemreagent*, 2012, vol. 50, no. 11, pp. 708-713.
13. Jung S., Kim S., Lee S. Issledovaniya sinteza i spekaniya Dy₂TiO₅, poluchennogo khimicheskim protsessom na polimernom nositele [Studies of the synthesis and sintering of Dy₂TiO₅ obtained by a chemical process on a polymer carrier]. *J. Nucl. Mater*, 2006, vol. 354, pp. 137-142.

14. Panneerselvam G. et al. Teplofizicheskie izmereniya titanatov disproziya i gadoliniya [Thermophysical measurements of dysprosium and gadolinium titanates]. *J. Nucl. Mater*, 2004, vol. 327, pp. 220-225.

15. Toporova V. G., Pimenov V. V., Risovanyi V. D., Zakharov A. V. Results of SM reactor tests of dysprosium hafnate [Results of SM reactor tests of dysprosium hafnate]. *Atomic Energy*, 2011, 110(4), pp. 259-264.

16. Eremeeva Z.V., Kaplanskiy Y.Y., Vorotylo S. et al. Fabrication of Nanodispersed Powder of Dysprosium Hafnate Dy₂HfO₅ by Mechanochemical Method. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2021, 12, pp. 1042-1046.

17. Cepeda-Sánchez N. M., Fuentes A. F., López-Cota F. A., Rodríguez-Reyes M., Díaz-Guillén J. A. Mechanochemical synthesis and electrical properties of Gd₂Hf₂-xZr_xO₇ solid electrolytes for their use in SOFC's. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2015, no. 45(11), pp. 1231-1237.

18. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Otsenka effektivnosti primeneniya tverdosplavnykh elektroerozionnykh poroshkov v kachestve elektrodno materiala [Evaluation of the effectiveness of the use of carbide electroerosion powders as an electrode material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 1, pp. 19-22.

19. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Provedenie rentgenospektral'nogo mikroanaliza tverdosplavnykh elektroerozionnykh poroshkov [Conducting X-ray spectral microanalysis of carbide electroerosion powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 5-2 (44), pp. 99-102.

20. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem tverdogo splava [Investigation of the chemical composition of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 138-144.

21. Ageeva E.V., Latypov R.A., Burak P.I., Ageev E.V. Poluchenie tverdosplavnykh izdelii kholodnym izostaticheskim pressovaniem elektroerozionnykh poroshkov i ikh issledovanie [Obtaining hard-alloy products by cold isostatic pressing of electroerosive powders and their research]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 5 (50), pp. 116-125.

22. Ageev E.V., Gadlov V.N., Ageeva E.V., Bobryshev R.V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tver-dykh splavov - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei 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.

Информация об авторах / Information about the Authors

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1790-5004>

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Шарипзянова Гюзель Харьясовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: guzel@mtw.ru

Капланский Юрий Юрьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-учебного центра НУЦ СВС НИТУ МИСиС, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: yury.kaplansky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2153-0743>

Ниткин Николай Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kolia-msk@yandex.ru

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, ассистент кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: aman1aotero@gmail.com

Орлов Вадим Леонидович, старший преподаватель кафедры иностранных языков, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vadimorlov67@mail.ru

Саенко Анна Александровна, магистрант кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: saenko_anna_99@mail.ru

Zhanna V. Eremeeva, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1790-5004>

Evgeny V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Gyuzel K. Sharipzyanova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Metallurgy Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: guzel@mtw.ru

Yuri Y. Kaplansky, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher at the Scientific and Educational Center of NUC of NUST MISIS, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: yuri.kaplansky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2153-0743>

Nikolay M. Nitkin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Materials Science Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: kolia-msk@yandex.ru

Amankeldy S. Akhmetov, Assistant of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: aman1aotero@gmail.com

Vadim L. Orlov, Senior Lecturer of the Foreign Languages Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: vadimorlov67@mail.ru

Anna A. Saenko, Master's Student of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: saenko_anna_99@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>

Математическое моделирование ходьбы человека в реабилитационном экзоскелете с помощью метода видеоанализа походки

А. С. Печурин¹, А. В. Федоров¹, А. С. Яцун¹, С. Ф. Яцун¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Одним из путей повышения эффективности систем реабилитации пациентов с нарушениями опорно – двигательного аппарата является применение экзоскелетов, позволяющих обеспечить заданное врачом –реабилитологом движение нижних конечностей по законам, близким к естественной походке. Для получения соответствующих закономерностей в статье рассматривается метод, основанный на построении траекторий движения голеностопного сустава (ГСС) с последующим синхронным определением углов поворота звеньев нижних конечностей на основе численного решения задачи обратной кинематики. Известно, что использование упрощенных законов движения ГСС и стоп без учета антропометрических параметров пациента приводит к формированию неправильной походки и, как следствие, значительному увеличению времени реабилитации пациента. Поэтому, при построении математической модели паттернов движения голеностопного сустава предлагается применять метод видеозахвата выбранных на ГСС и стопе точек-маркеров, с последующей обработкой и аппроксимацией получаемых сигналов с помощью полиномов, что обеспечивает высокую точность воспроизведения паттернов движения. Целью исследования является построение законов движения звеньев экзоскелета по траектории движения ГСС на основе численного решения задачи обратной кинематики.

Методы. Для достижения поставленной цели применяются экспериментальные исследования ходьбы с построением траектории движения ГСС по видеофрагменту, сглаживание и аппроксимация этой траектории и решение задачи обратной кинематики.

Результаты. Предложен метод построения и обработки траектории движения стопы и нахождения кинематических характеристик движения звеньев для создания паттернов движения экзоскелета при походке.

Заключение. Результаты моделирования показали, что предложенные методы построения траектории движения и моделирования походки экзоскелета позволяют с высокой точностью повторить походку человека при проведении реабилитационных процедур.

Ключевые слова: походка человека; математическое моделирование походки человека; решение обратной задачи кинематики скорости; экзоскелет; видеоанализ траектории; CAD-модель.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-08-044А.

© Печурин А. С., Федоров А. В., Яцун А. С., Яцун С. Ф., 2021

Для цитирования: Математическое моделирование ходьбы человека в реабилитационном экзоскелете с помощью метода видеоанализа походки / А. С. Печурин, А. В. Федоров, А. С. Яцун, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 27-40. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>.

Поступила в редакцию 14.05.2021

Подписана в печать 10.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Mathematical Modeling of Human Gait in a Rehabilitation Exoskeleton Using Gait Video Analysis Method

Alexander S. Pechurin ¹, Alexander V. Fedorov ¹, Andrei S. Jatsun ¹,
Sergey F. Jatsun ¹ ✉

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research One of the ways to increase effectiveness of rehabilitation systems for patients with musculoskeletal disorders is the use of exoskeletons, which make it possible to ensure lower limbs movement according to the laws close to natural gait set by the rehabilitation therapist. The article considers a method based on construction of ankle joint motion trajectories (AJ) followed by synchronous determination of rotation angles of lower limb links based on numerical solution of inverse kinematics problem. It is known that the use of simplified laws of ankle joint movement and feet without taking into account anthropometric parameters of a patient leads to the formation of an incorrect gait and, as a result, a significant increase in rehabilitation time of a patient. Therefore, when constructing mathematical model of ankle motion patterns, it is proposed to use the method of video capture of marker points selected on AJ and foot, followed by processing and approximation of received signals using polynomials, which provides high accuracy of reproducing motion patterns. Purpose of research is to build motion laws of exoskeleton links along the trajectory of AJ motion based on a numerical solution of inverse kinematics problem.

Methods. Experimental walking studies with the construction of AJ motion trajectory based on video fragment, smoothing and approximation of this trajectory and solving reverse kinematics problem are used to achieve this goal.

Results. Method for construction and processing of foot motion trajectory and finding kinematic characteristics of links motion for creation of exoskeleton motion patterns in gait is introduced.

Conclusion. Simulation results shows that proposed methods of constructing motion trajectory and gait modeling of the exoskeleton make it possible to copy the gait of a person with high accuracy in rehabilitation process.

Keywords: human gait; mathematical modeling of human gait; solution of reverse problem of speed kinematics; exoskeleton; trajectory video analysis; CAD model.

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

Funding: The work was carried out with the support of the RFFI grant No. 19-08-044A.

For citation: Pechurin A. S., Fedorov A. V., Jatsun A. S., Jatsun S. F. Mathematical Modeling of Human Gait in a Rehabilitation Exoskeleton Using Gait Video Analysis Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 27-40 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-27-40>.

Received 14.05.2021

Accepted 10.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

В стране сегодня насчитываются десятки тысяч больных с повреждением опорно-двигательного аппарата (ОДА). Чаще всего травмы ОДА получают мужчины молодого трудоспособного возраста, причем соотношение пациентов в возрасте от 20 до 40 лет и от 41 до 65 лет составляет 45 и 49% соответственно. Большинство пациентов получают травмы в дорожно-транспортных происшествиях. Поэтому, обычно пациентам требуется несколько оперативных вмешательств с последующей длительной реабилитацией, что позволяет через 3-5 месяцев после получения травмы возвращаться к активной жизни. В то же время, тяжелые травмы опорно-двигательного аппарата, в ряде случаев, приводят к инвалидизации пациентов [1]. Одним из способов реабилитации таких больных является применение индивидуальных экзоскелетов, позволяющих осуществлять сложные виды движения, такие как вертикализация пациента, приседания, ходьба и другие. Попытки разработки и создания экзоскелетов предпринимались давно, последнее время стали появляться изделия, обеспечивающие движение пациента в режимах ходьбы [2,3]. Использование подобных аппаратов способствует значительному сокращению времени восстановления пациента после травм, повышая эффективность реабилитации. При разработке и создании экзоскелетов используются

современные методы компьютерного моделирования, позволяющие исследовать характеристики движения нижних конечностей пациента и экзоскелета. Одной из основных задач остается разработка паттернов движения и оптимизация параметров системы управления экзоскелетом, что позволяет проектировать персонифицированные системы реабилитации для восстановления пациентов.

Из многообразия аппаратов для восстановления ОДА наиболее подходящим является экзоскелет нижних конечностей – двуногий робот, позволяющий проводить различные реабилитационные упражнения, обеспечивающие восстановление нижних конечностей пациента [4]. Для обеспечения работы экзоскелета в режиме походки, заданной врачом-реабилитологом, необходимо точно задавать траекторию движения ГСС и стоп с учетом антропометрических параметров человека. Эти данные позволяют рассчитать оптимальные управляющие воздействия и паттерны движения экзоскелета для людей с различными степенями поражения ОДА.

Материалы и методы

Описание экзоскелета

Аппарат для реабилитации людей с нарушением ОДА представляет собой управляемый экзоскелет нижних конечностей [4], способный повторить, заданный врачом-реабилитологом, закон движения нижних конечностей (рис.1). Схематически экзоскелет представляет

собой 9-звенный механизм, элементы которого связаны между собой шарнирами, каждый из которых, оснащен управляемым электроприводом. Шарниры обозначены буквами A_i ($i=0, \dots, 7$). Причем, шарниры A_1 и A_6 являются двухкоординатными и обозначены A_{1x} ; A_{1y} ; A_{6x} ; A_{6y} .

Положение звеньев экзоскелета в любой момент времени, задается вектором обобщенных координат $\bar{q}(t) = (q_{00}, \dots, q_{80})^T$, $\bar{q} \in R^n$, где n – число обобщенных координат, которые определяют абсолютные углы поворота звеньев; q_{00} – определя-

ет поворот передней части правой стопы (пальцы) относительно опорной поверхности; q_{10} – поворот задней части стопы относительно опорной поверхности; q_{20} – поворот правой голени; q_{80} – поворот передней части левой стопы (пальцы) относительно опорной поверхности и так далее. На вектор $\bar{q}(t)$ наложены ограничения, определяемые физиологическими особенностями человека. $\bar{q}^- \leq \bar{q} \leq \bar{q}^+$, где $\bar{q}^-$, $\bar{q}^+$ – предельные значения обобщенных координат.

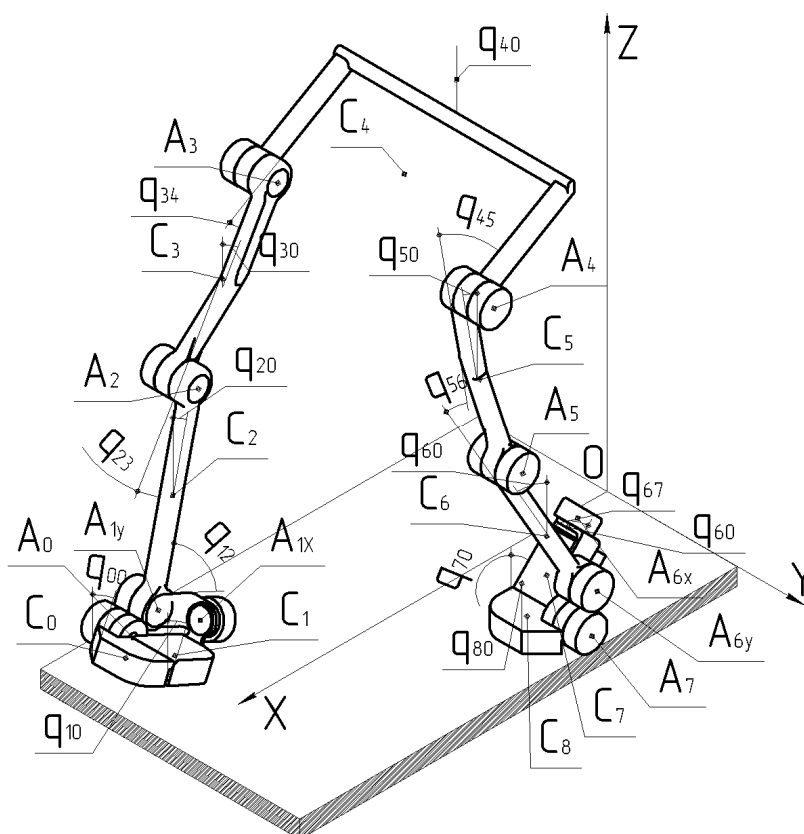


Рис. 1. Схема экзоскелета нижних конечностей. A_i ($i=0, \dots, 7$) – шарниры с управляемыми приводами, C_j ($j=0, \dots, 8$) – центры масс звеньев, $q_{00}, \dots, q_{80}$ – обобщённые координаты, описывающие взаимное расположение звеньев экзоскелета, которое зависит от траектории движения ГСС

Fig. 1. Diagram of the lower limbs exoskeleton. A_i ($i=0, \dots, 7$) - joints with controlled drives, C_j ($j=0, \dots, 8$) - centers of mass of the links, $q_{00}, \dots, q_{80}$ - generalized coordinates describing the relative position of the links of the exoskeleton, which depends on the trajectory of the AJ

Построение траектории движения центра масс

Синтез задающих законов $\bar{q}(t)$ [5-9] осуществляется путем решения обратной задачи кинематики. Для этого необходимо определить следующие параметры ходьбы: L – длина шага, T – время выполнения шага, $2y_m$ – расстояние между стопами во фронтальной плоскости. Задаем желаемые законы движения центра масс (ЦМ), определяемые радиус вектором:

$$\bar{r}_c(t) = (x_c, y_c, z_c)^T. \quad (1)$$

Для обеспечения устойчивого вертикального положения проекции ЦМ на горизонтальную плоскость, должны лежать в опорном полигоне. Также задаем траектории движения стоп $\bar{r}_{A_i}(t)$, $i = 1$ – для правой стопы, $i = 6$ – для левой. Стопы двигаются синхронно с центром масс, обеспечивая его положение в опорном полигоне. Точки A_i (ГСС) ($i=1$ или 6), принадлежащие стопам, совершают движение по некоторым пространственным траекториям.

На рис. 2 показан пример кусочно-линейной траектории. Движение начинается из двухопорной фазы и при этом происходит перенос центра масс на левую стопу во фронтальной плоскости, а далее происходит перенос центра масс в сагиттальной плоскости вдоль стопы. При этом правая стопа переходит на расстояние $L/2$ вдоль оси Ox . В следующий момент времени происходит перенос центра масс во фронтальной

плоскости с левой стопы на правую. Далее движения повторяются.

В начальный момент времени центр масс экзоскелета (ЦМЭ) находится в точке "О", совпадающей с началом координат системы ОХУ. Движение ЦМЭ начинается из точки "О" вдоль оси ОУ (во фронтальной плоскости). При выполнении условия $y_c = y_m$, ЦМЭ начинает перемещаться вдоль оси ОХ (в сагиттальной плоскости). При этом правая стопа также перемещается вдоль оси ОХ. При выполнении условия $x_c = L/4$, начинается перенос ЦМЭ вдоль оси ОУ на правую стопу. Достигнув условия $y_c = -y_m$, ЦМЭ разворачивается и движется вдоль оси Ох, одновременно левая стопа также перемещается вдоль оси Ох до выполнения условия $x_c = 3L/4$. На диаграмме хорошо видно, что центр масс проходит расстояние вдоль оси Ох в два раза меньше, чем точка А, принадлежащая стопе. Далее, происходит периодическое движение центра масс и стоп, обеспечивающее перемещение центра масс вдоль оси Ох. Таким образом, шаг осуществляется за три этапа.

Преимуществом такой траектории является то, что движение звеньев экзоскелета происходит последовательно в сагиттальной и фронтальной плоскостях независимо друг от друга, что позволяет обеспечить движение пациента при сравнительно невысоких требованиях к управляющему алгоритму. Законы изменения координат центра масс от

времени на каждом участке траектории представим в виде:

$$x_C(t) = \sum_{i=0}^3 c_i t^i; y_C(t) = \sum_{i=0}^3 d_i t^i; z_C(t) = \sum_{i=0}^3 e_i t^i, (2)$$

где c_i, d_i, e_i – постоянные, определяемые из граничных условий.

Будем считать, что время выполнения одного шага равно T . Представим траекторию в виде отрезков прямой. Шаг разобьем на четыре участка и положим, что сшивка участков происходит при условии равенства соответствующих координат и скоростей, что отражается в граничных условиях. Время движения по участку составит $T/4$.

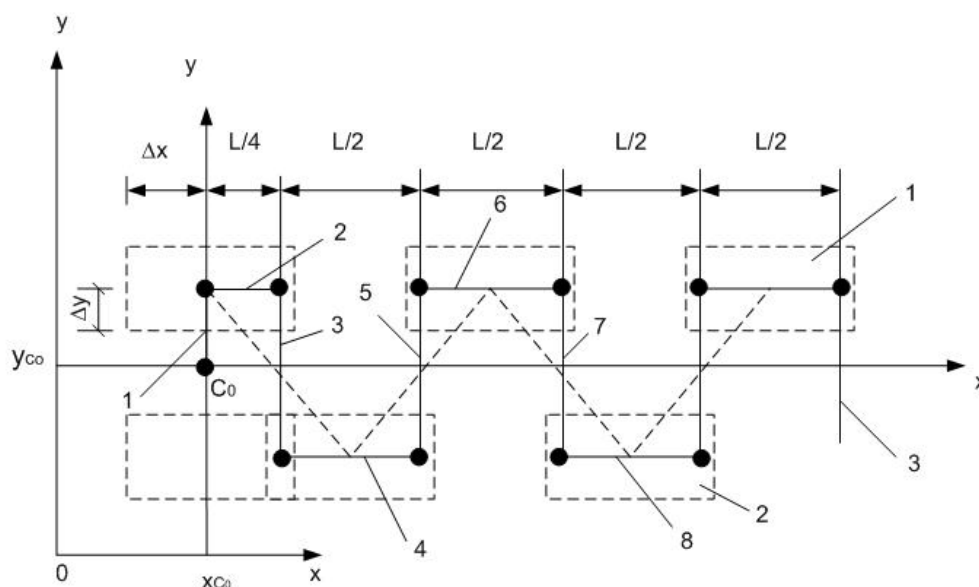


Рис. 2. Схема движения центра масс: y_{C0}, x_{C0} – положение начала локальной системы координат; $\Delta x, \Delta y$ – положение центра масс на стопе в начале одноопорной фазы. **1,3,5,7** – фрагменты траектории ЦМ во фронтальной плоскости; **2,4,6,8** – фрагменты траектории ЦМ в сагиттальной плоскости

Fig. 2. Scheme of mass center movement: y_{C0}, x_{C0} – the position of the origin of the local coordinate system; $\Delta x, \Delta y$ – the position of mass center on the foot at the beginning of single-support phase; **1,3,5,7** – fragments of MC trajectory in the frontal plane; **2,4,6,8** – fragments of MC trajectory in sagittal plane

Построение траектории движения ГСС

Наиболее точно построение траектории движения стопы человека можно осуществить с помощью обработки и анализа экспериментальных данных походки человека. Для этого, в работе применена программа анализа и моде-

лирования видеофрагментов, полученных в ходе проведения физических экспериментов – «tracker». Эта программа предназначена для физического образования данных [10]. После обработки шага человека программой видеонализа, полученные массивы данных переносятся в рабочее пространство MATLAB (рис. 3).

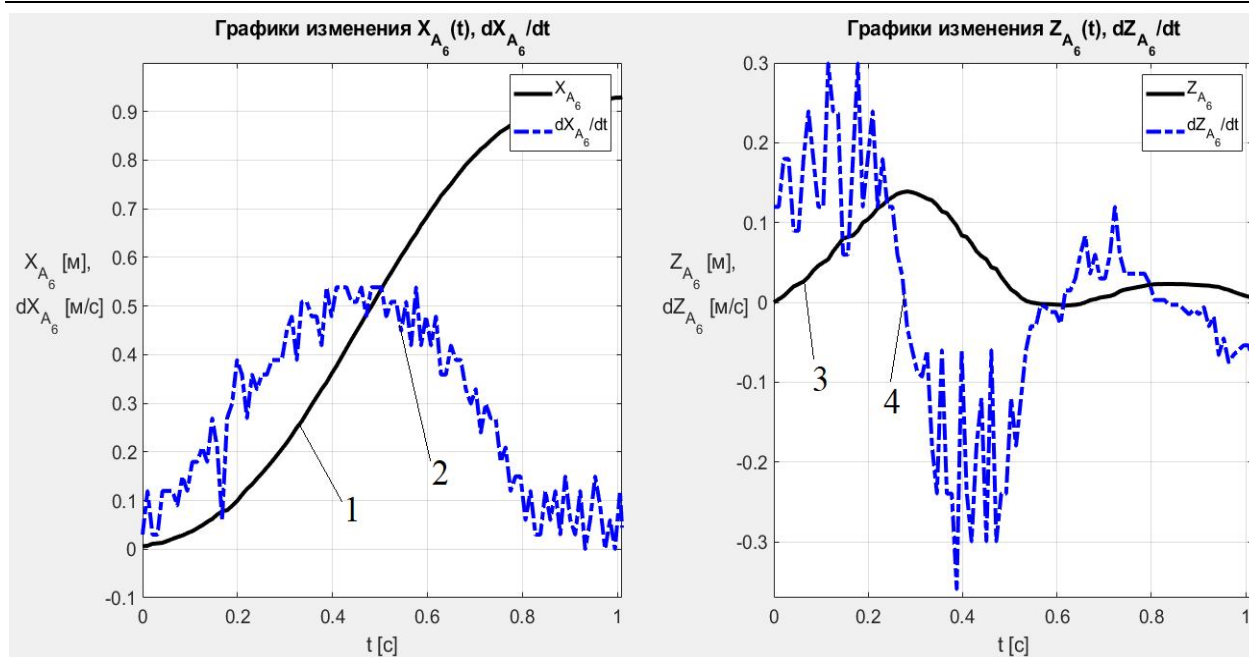


Рис. 3. Графики изменения экспериментально полученных законов движения ГСС и соответствующих скоростей: **1** – X_{A_6} ; **2** – $\dot{X}_{A_6}$; **3** – Z_{A_6} ; **4** – $\dot{Z}_{A_6}$

Fig. 3. Graphs of changes in experimentally obtained laws of AJ motion and corresponding speeds: **1** – X_{A_6} ; **2** – $\dot{X}_{A_6}$; **3** – Z_{A_6} ; **4** – $\dot{Z}_{A_6}$

Полученные графики изменения производных траектории ГСС имеют ярко выраженный колебательный характер (см. рис. 3), поэтому требуется сглаживание полученных в эксперименте зависимостей $X_{A_6}(t)$, $Z_{A_6}(t)$.

Сглаживание траектории

Чтобы сгладить полученные в ходе эксперимента значения $X_{A_6}(t)$, $Z_{A_6}(t)$ используется функция «smooth» программного пакета MATLAB, которая сглаживает данные с помощью фильтра скользящего среднего [11,12]. Результатом сглаживания данных является траектория движения стопы, представленная на рис. 4.

Представленные на рис. 4 сглаженные графики изменения кинематики дви-

жения ГСС имеют более плавный характер изменения, чем изначальные и существенно меньшие крайние значения, однако производные по-прежнему имеют колебательный характер изменения. Поэтому для получения траектории оптимального вида применяется аппроксимация гладкой функцией.

Аппроксимация законов движения ГСС

Для нахождения закона изменения движения ГСС из данных, полученных в ходе эксперимента, можно применить аппроксимацию функцией «polyfit» программного пакета MATLAB, возвращающей коэффициенты полинома n -ой степени, которые подходят для описания аппроксимируемых данных [13, 14].

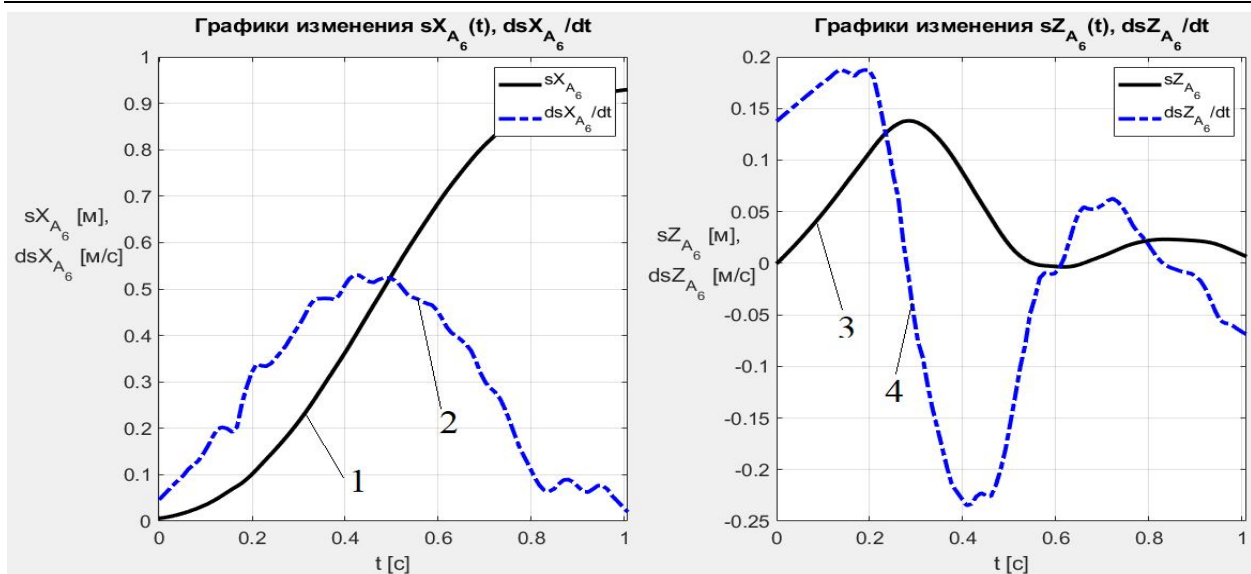


Рис. 4. Графики изменения "сглаженных" законов движения ГСС и соответствующих скоростей траектории движения ГСС: 1 – sX_{A_6} ; 2 – $s\dot{X}_{A_6}$; 3 – sZ_{A_6} ; 4 – $s\dot{Z}_{A_6}$.

Fig. 4. Graphs of changes in "smoothed" laws of AJ motion and corresponding velocities of AJ trajectory: 1 – sX_{A_6} ; 2 – $s\dot{X}_{A_6}$; 3 – sZ_{A_6} ; 4 – $s\dot{Z}_{A_6}$.

Итоговые законы изменения координат стопы будут иметь вид [15]:

$$X_{A_6} = \sum_{i=0}^{n_x} a_i \cdot t^i; Z_{A_6} = \sum_{j=0}^{n_z} b_j \cdot t^j, \quad (3)$$

где n_x и n_z – порядок полинома; t – время, коэффициенты a_i и b_j находятся с помощью вышеописанной функции «polyfit».

Графики изменения аппроксимированных законов движения ГСС, полученные на основании обработки экспериментальной траектории, представлены на рис. 5.

После аппроксимации полиномом траектории движения стопы графики изменения которой, представлены на рис. 5 приобрели удовлетворительный для дальнейшего моделирования вид.

Обратная кинематика экзоскелета (ОКЭ)

Нахождение вектора обобщённых координат (4), при заданной траектории

движения стопы, осуществляется с помощью решения обратной задачи кинематики [16-20].

$$\bar{q}(t) = (q_{00}, \dots, q_{80})^T. \quad (4)$$

Рассмотрим задачу (ОКЭ) для одноопорной фазы при опоре на правую стопу. Определим вектор – функцию – $\bar{F}(\bar{q})$ (5), которая определяет значения, соответствующие проекциям центра масс, стопы и положения спины в зависимости от обобщённых координат $\bar{q}$.

$$\bar{F}(\bar{q}) = [\bar{r}_C(\bar{q}), \bar{r}_{A_6}(\bar{q})]^T. \quad (5)$$

Введем вектор-функцию:

$$\bar{\Phi}_F(t) = [\bar{r}_C(t), \bar{r}_{A_6}(t)]^T. \quad (6)$$

Обозначим псевдообратную матрицу Якоби

$$J^+ = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^+. \quad (7)$$

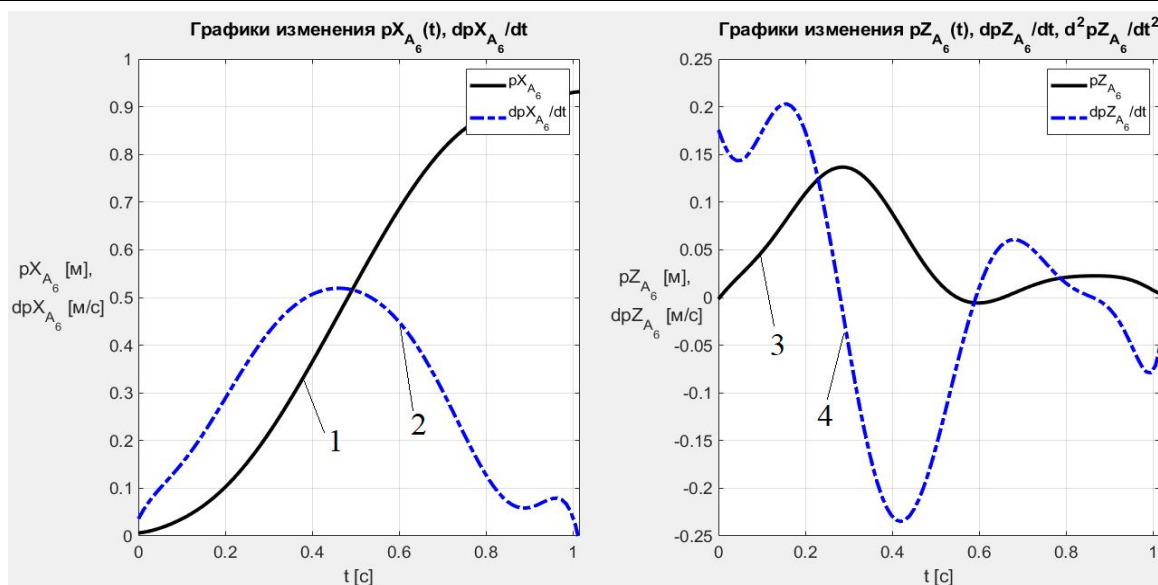


Рис. 5. Графики изменения аппроксимированных законов движения ГСС и соответствующих скоростей траектории движения ГСС на основании обработки экспериментально полученной траектории: 1 – pX_{A6} ; 2 – $p\dot{X}_{A6}$; 3 – pZ_{A6} ; 4 – $p\dot{Z}_{A6}$; 5 – $p\ddot{X}_{A6}$; 6 – $p\ddot{Z}_{A6}$

Fig. 5. Graphs of changes in approximated laws of AJ motion and corresponding velocities of AJ trajectory motion based on the processing of experimentally obtained trajectory:

1 – pX_{A6} ; 2 – $p\dot{X}_{A6}$; 3 – pZ_{A6} ; 4 – $p\dot{Z}_{A6}$; 5 – $p\ddot{X}_{A6}$; 6 – $p\ddot{Z}_{A6}$

Тогда, в дискретной форме выражение перепишем в виде:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + J_F^+ \Delta \bar{\Phi}_F(t), \quad (8)$$

где $\Delta \bar{\Phi}_F(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}_F(t)$ на временном шаге Δt .

Полученное соотношение позволяет находить вектор обобщенных координат $\bar{q}$ на $k+1$ -м временном шаге по известному значению $\bar{q}$ на k -м шаге.

Результаты и их обсуждение

На рис. 6 - 7 приведены диаграммы, отражающие изменения кинематических характеристик вращательного движения звеньев экзоскелета.

Выводы

1. Разработан метод построения законов движения нижних конечностей,

основанный на экспериментально определенной траектории движения голеностопного сустава (ГСС) с последующим синхронным расчетом углов поворота звеньев нижних конечностей на основе численного решения задачи обратной кинематики, позволяющий обеспечить заданное врачом - реабилитологом движение нижних конечностей пациента.

2. Предложен метод построения траектории движения ГСС с использованием процедуры сглаживания и аппроксимации траектории по видеофрагменту эксперимента.

3. Решена обратная задача кинематики скорости и проведено математическое моделирование походки реабилитационного экзоскелета, в ходе которого была получена информация о кинематике его звеньев, необходимая для создания паттернов движения аппарата.

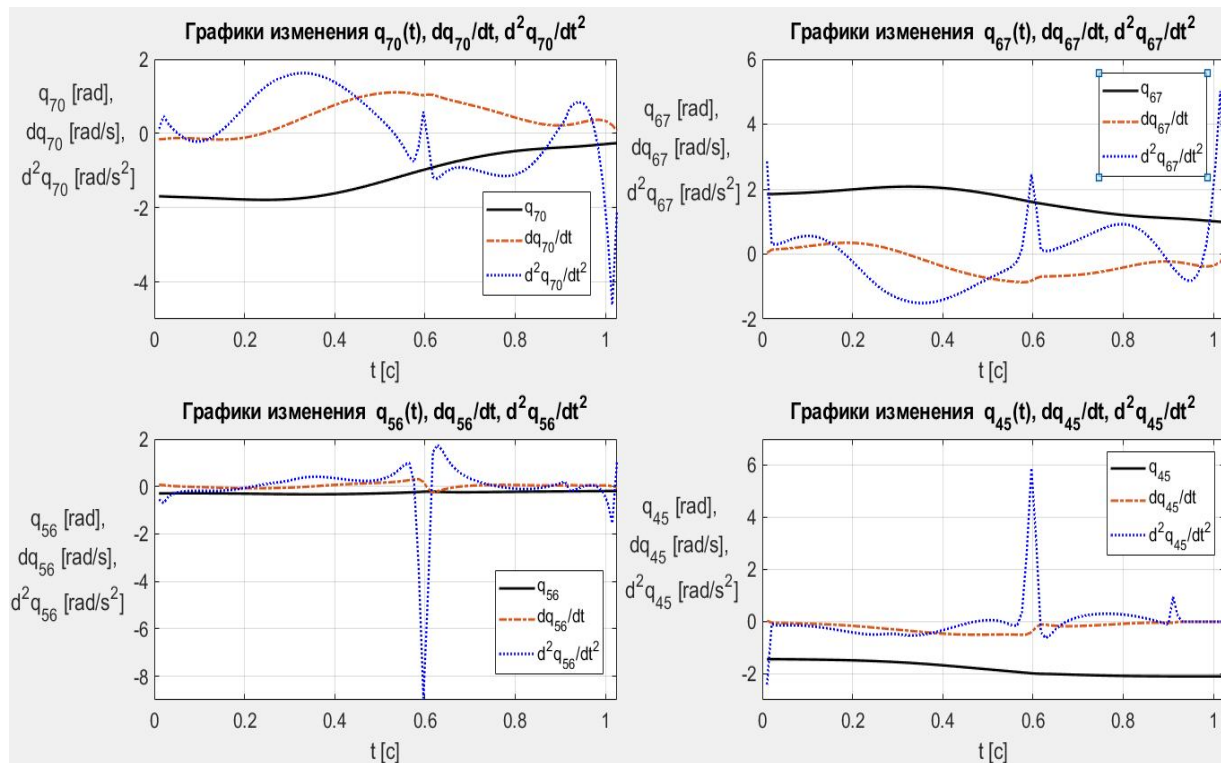


Рис. 6. Графики изменения кинематических характеристик углов. $q_{70}, q_{67}, q_{56}, q_{45}$

Fig. 6. Graphs of changes of kinematic characteristics of angles. $q_{70}, q_{67}, q_{56}, q_{45}$

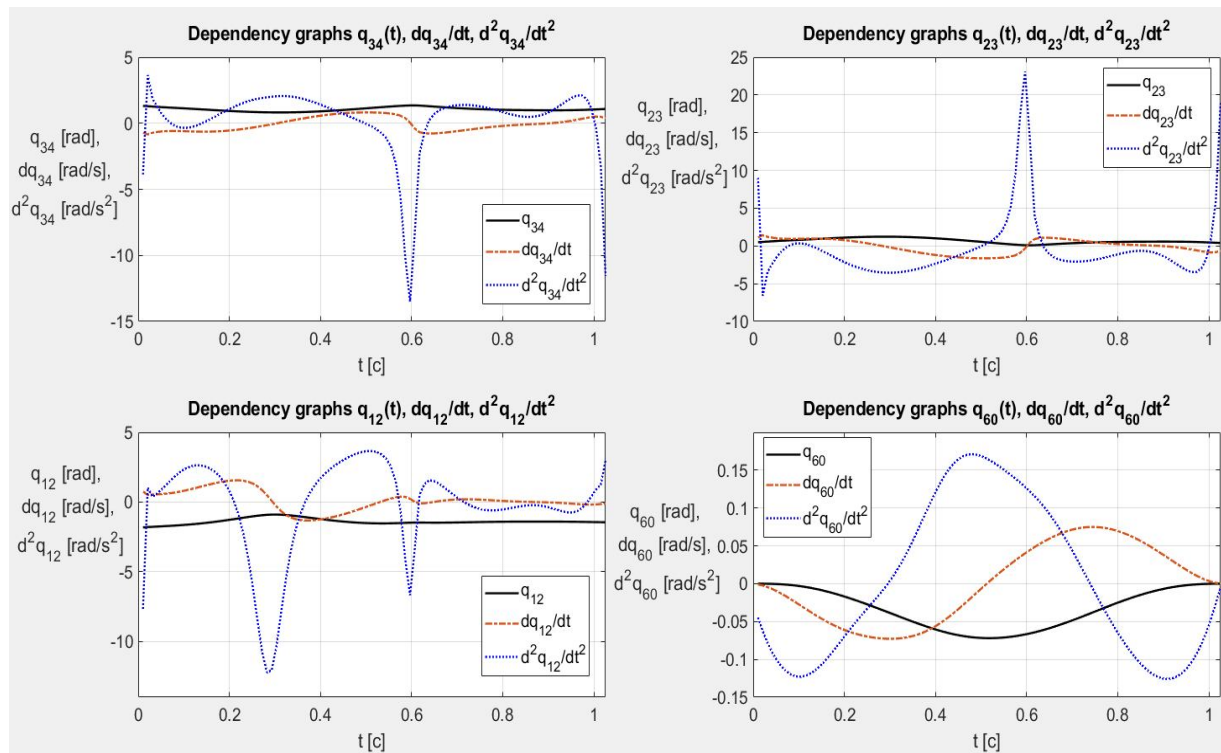


Рис. 7. Графики изменения кинематических характеристик углов. $q_{34}, q_{23}, q_{12}, q_{60}$

Fig. 7. Graphs of changes of kinematic characteristics of angles s. $q_{34}, q_{23}, q_{12}, q_{60}$

Список литературы

1. Динамика распространения заболеваний ОДА в России и в мире // Здоровье позвоночника и суставов. URL: https://spinet.ru/public/dinamika_rasprostraneniya_oda.php.
2. Воробьев А. А. и др. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) // Современные технологии в медицине. 2015. Т. 7. №. 2.
3. Zhang C. et al. Development of a lower limb rehabilitation exoskeleton based on real-time gait detection and gait tracking // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Т. 8. № 1. С. 1687814015627982.
4. Яцун С. Ф., Яцун А. С., Корневский Н. А. Опыт проектирования реабилитационных экзоскелетов // Медицинская техника. 2017. №. 3. С. 48-51.
5. Яцун С. В. и др. Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. №. 6. С. 176-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.
6. Хусаинов Р. Р., Климчик А. А., Магид Е. А. Метод управления движением двуногого шагающего робота по произвольной траектории // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 10. С. 633-641.
7. Котов Е. А., Друк А. Д., Клыпин Д. Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. №. 4 (178). С. 91-97.
8. Белов М. П., Козлова Л. П., Чыонг Д. Д. Система управления электроприводами движения нижних конечностей экзоскелета на основе ПД-регулятора с нейронной сетью // Электротехника. 2021. №. 3. С. 36-41.
9. Капустин А. В. и др. Способы поддержания устойчивого положения реабилитационного экзоскелета медицинского назначения при ходьбе // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. №. 3. С. 44-54.
10. Tracker // Tracker Video Analysis and Modeling Tool. URL: <https://physlets.org/tracker/>.
11. Михеев С. Е. О сглаживании функций // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2014. №. 4.
12. smooth // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html>.
13. Вершик А. М., Малоземов В. Н., Певный А. Б. Наилучшая кусочно-полиномиальная аппроксимация // Сибирский математический журнал. 1975. Т. 16. №. 5. С. 925-938.
14. polyfit // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.

15. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments // *Robotics research*. Springer, Cham, 2016. P. 649-666.
16. Колтыгин Д. С., Седельников И. А., Петухов Н. В. Аналитический и численный методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. №. 5 (124).
17. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. СПб., 2016. 105 с.
18. Zhao R. et al. Inverse kinematic solution of 6R robot manipulators based on screw theory and the Paden–Kahan subproblem // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. Vol. 15. №. 6. P. 1729881418818297.
19. Singh T. P., Suresh P., Chandan S. Forward and inverse kinematic analysis of robotic manipulators // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4. №. 2. P. 1459-1468.
20. Arian A., Danaei B., Tale Masouleh M. Kinematic and Dynamic Analyses of Tripteron, an Over-Constrained 3-DOF Translational Parallel Manipulator, through Newton-Euler Approach // *AUT Journal of Modeling and Simulation*. 2018. Vol. 50. №. 1. P. 61-70.

References

1. [The dynamics of the spread of diseases of ODA in Russia and in the world]. *Zdorov'e pozvonochnika i sustavov = Health of the spine and joints*. (In Russ). Available at: https://spinet.ru/public/dinamika_rasprostraneniya_oda.php.
2. Vorobiev A.A. et al. Ekzoskelet kak novoe sredstvo v abilitatsii i reabilitatsii invalidov (obzor) [Exoskeleton as a new tool in the habilitation and rehabilitation of disabled people (review)]. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*, 2015, vol. 7, no. 2.
3. Zhang C. et al. Development of a lower limb rehabilitation exoskeleton based on real-time gait detection and gait tracking. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 1687814015627982.
4. Yatsun S. F., Yatsun A. S., Korenevsky N. A. Opyt proektirovaniya reabilitatsionnykh ekzoskeletov [Experience in the design of rehabilitation exoskeletons]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Technology*, 2017, no. 3, pp. 48-51.
5. Yatsun S. V. et al. Modelirovanie patternov pokhodki patsienta s povrezhdeniem oporno-dvigatel'nogo apparata s pomoshch'yu ekzoskeleta [Modeling gait patterns of a patient with damage to the musculoskeletal system using an exoskeleton]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2019, vol. 23, no. 6, pp. 176-188 (In Russ). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.

6. Khusainov R.R., Klimchik A.A., Magid E.A. Metod upravleniya dvizheniem dvunogogo shagayushchego robota po proizvol'noi traektorii [Method of motion control of a two-legged walking robot along an arbitrary trajectory]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2018, vol. 19, no. 10, pp. 633-641.

7. Kotov E.A., Druk A.D., Klypin D.N. Razrabotka ekzoskeleta nizhnikh konechnostei cheloveka dlya meditsinskoi reabilitatsii [Development of the exoskeleton of the lower limbs of the human for medical rehabilitation]. *Omskii nauchnyi vestnik* = *Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 4 (178), pp. 91-97.

8. Belov M.P., Kozlova L.P., Chyong D.D. Sistema upravleniya elektroprivodami dvizheniya nizhnikh konechnostei ekzoskeleta na osnove PD-regulyatora s neironnoi set'yu [Control system for electric drives of movement of the lower extremities of the exoskeleton based on a PD controller with a neural network]. *Elektrotehnika*, 2021, no. 3, pp. 36-41.

9. Kapustin A.V. et al. Sposoby podderzhaniya ustoichivogo polozheniya reabilitatsionnogo ekzoskeleta meditsinskogo naznacheniya pri khod'be [Ways to maintain a stable position of a medical rehabilitation exoskeleton when walking]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* = *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2018, n. 3, pp. 44-54.

10. Tracker. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. Available at: <https://physlets.org/tracker/>.

11. Mikheev S.E. O sglazhivanii funktsii [On smoothing functions]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* = *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 4.

12. Smooth. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html>.

13. Vershik A.M., Malozemov V.N., Pevnyy A.B. Nailuchshaya kusochno-polinomial'naya approksimatsiya [The best piecewise polynomial approximation]. *Sibirskiy matematicheskii zhurnal* = *Siberian Math. Magazine*, 1975, vol. 16, no. 5, pp. 925-938.

14. Polyfit. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.

15. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments. *Robotics research*. Springer, Cham, 2016, pp. 649-666.

16. Koltygin D.S., Sedelnikov I.A., Petukhov N.V. Analiticheskii i chislennyy metody resheniya obratnoi zadachi kinematiki dlya robota Delta [Analytical and numerical methods for solving the inverse problem of kinematics for the Delta robot]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 5 (124).

17. Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A. *Metody upravleniya robototekhnicheskimi prilozheniyami* [Methods for controlling robotic applications]. St. Petersburg, 2016. 105 p.
18. Zhao R. et al. Inverse kinematic solution of 6R robot manipulators based on screw theory and the Paden–Kahan subproblem. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, vol. 15, no. 6, pp. 1729881418818297.
19. Singh T. P., Suresh P., Chandan S. Forward and inverse kinematic analysis of robotic manipulators. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 1459-1468.
20. Arian A., Danaei B., Tale Masouleh M. Kinematic and Dynamic Analyses of Tripteron, an Over-Constrained 3-DOF Translational Parallel Manipulator, through Newton-Euler Approach. *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 61-70.

Информация об авторах / Information about the Authors

Печурин Александр Сергеевич, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru

Alexander S. Pechurin, Master's Degree Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru

Федоров Андрей Владимирович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrei V. Fedorov, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией НИЛ МИР, кафедра механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ayatsun@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-7295>, Web of Science ResearcherID N-6212-2016

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Head of Research Laboratory MIR, Associate Professor, Senior Researcher of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ayatsun@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-7295>, Web of Science ResearcherID N-6212-2016

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, Web of Science ResearcherID G-3891-2017

Sergey F. Jatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, Web of Science ResearcherID G-3891-2017

Архитектурно-конструктивные принципы строительства деревянных зданий возрастом более ста лет

Л.Ю. Ступишин¹, А.В. Масалов² ✉

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, д.26, г. Москва 129337, Российская Федерация

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

✉ e-mail: masalow.al@ya.ru

Резюме

Цель исследования. Анализ накопленной информации о конструктивных решениях, применённых при строительстве зданий и сооружений из древесины, обеспечивших сохранность элементов конструкции и материалов, и позволяющих длительное время поддерживать их работоспособное состояние. Изучение влияния эксплуатационных воздействий на элементы здания и разработка рекомендаций по восстановлению и обеспечению сохранности зданий и сооружений из древесины, отнесённых к объектам культурного наследия.

Методы. Выявление причинно-следственных связей используемых конструктивных решений и материалов с устранением деградационных процессов в несущих конструкциях на основе камеральной обработки результатов визуально-инструментального обследования.

Результаты. Собраны данные об истории, объёмно-планировочном решении и конструктивном решении объекта культурного наследия. Выявлены причинно-следственные связи защиты несущих конструкций от деградационных явлений в материалах конструкции путём конструктивных и планировочных решений здания храма.

Заключение. Здание храма имеет каноническое объёмно-планировочное решение, позволяющее поддерживать стабильный температурно-влажностный и аэрационный режим эксплуатации несущих конструкций здания в любое время года. Использование бутового фундамента из фосфоритного камня позволяет обеспечить защиту от неравномерных осадок здания, а так же защищает деревянные конструкции от грунтовой влаги. Фосфоритный камень и связующий раствор фундамента гидрофобны. Использована срубная техника возведения стен с обшивкой доской (шелёвкой) по типу навесного фасада, обеспечивающая проветривание древесины сруба. Обеспечена вентиляция пола, купола и его несущих конструкций. В отделке внутренних стен применены неиспользуемые в настоящее время материалы, надёжно защищающие древесину от атмосферных и биологических вредных воздействий.

Ключевые слова: деревянные конструкции; конструктивно-технологические решения; фосфоритный бутовый фундамент; деграционные процессы материала; восстановление; православный храм.

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

Для цитирования: Ступишин Л.Ю., Масалов А.В. Архитектурно-конструктивные принципы строительства деревянных зданий возрастом более ста лет // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 41-55. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-41-55>.

Поступила в редакцию 25.07.2021

Подписана в печать 10.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Architectural and Structural Principles of Construction of Wooden Buildings over a Hundred Years Old

Leonid Yu. Stupishin ¹, Alexander V. Masalov ² ✉

¹ National Research Moscow State Construction University
26 Yaroslavskoye rd., Moscow 129337, Russian Federation

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

✉ e-mail: masalov.al@ya.ru

Abstract

Purpose of research. Analysis of the accumulated information on design solutions used in the construction of buildings and structures made of wood, which ensured the safety of structural elements and materials, and allowing them to maintain their working condition for a long time. Study of the impact of operational impacts on building elements and development of recommendations for the restoration and preservation of timber buildings and structures classified as cultural heritage sites.

Methods. Revealing the cause-and-effect relationships of the used design solutions and materials with the elimination of degradation processes in the supporting structures on the basis of office processing of the results of visual and instrumental examination.

Results. We have collected data on the history, space-planning solution and constructive solution of the cultural heritage object. The cause-and-effect relationships of the protection of load-bearing structures from degradation phenomena in the materials of the structure by means of constructive and planning solutions for the building of the temple have been revealed.

Conclusion. The building of the temple has a canonical space-planning solution, which allows maintaining a stable temperature, humidity and aeration mode of operation of the supporting structures of the building at any time of the year. The use of a rubble foundation made of phosphorite stone provides protection against uneven settlement of the building, as well as protects wooden structures from soil moisture. The phosphorite stone and the foundation binder are hydrophobic. A log-house technique has been used for erecting walls with a boarding (thin board) according to the type of a curtain facade, which provides ventilation of the log house. Ventilation of the floor, dome and its supporting structures are provided. The interior walls are decorated with currently unused materials that reliably protect the wood from atmospheric and biological harmful effects.

Keywords: wooden structures; constructive and technological solutions; phosphate rubble stone foundation; material degradation processes; restoration; Orthodox church.

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

For citation: Stupishin L. Yu., Masalov A.V. Architectural and Structural Principles of Construction of Wooden Buildings over a Hundred Years Old. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 41-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-41-55>.

Received 25.07.2021

Accepted 10.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

В настоящее время древесина и материалы на основе древесины продолжают оставаться одним из основных видов строительных материалов. Древесина при строительстве культовых, жилых, общественных и других видов зданий и сооружений, наряду с камнем, применяется с момента постройки человеком первых сооружений, защищающих его от внешних воздействий. Общеизвестны как положительные, так и отрицательные свойства древесины.

При организации правильной эксплуатации, конструкции из древесины, как и из других основных строительных материалов, могут эксплуатироваться на протяжении столетий. Достаточно вспомнить храмовый комплекс в Хорюдзи (Япония), некоторые части деревянных зданий которого построены в 8 веке; жилой в настоящее время деревянный дом, на острове Стреймой (Фарерские острова, Дания), возраст которого отсчитывается с 11 века; храм Воскрешения Лазаря, находящийся ныне в государственном историко-архитектурном заповеднике на острове Киж, в республике Карелия, строительство которого датируется не позже 14 века, и многие другие.

Современные исследования силовых и средовых воздействий на элементы деревянных конструкции в нашей стране проводились Прокофьевым А.С., Кабановым В.А., Сморгачевым А.А. [1], Поветкиным С.В., Травушем В.И. [2, 3], Колчуновым В.И. [4], Дубраковой К.О. [5-10], Масаловым А.В. [11], Ступишиным Л.Ю. [12-14] и другими авторами.

Вопросы сохранения культурного наследия, реконструкции и реставрации зданий и сооружений, в том числе, отражены в работах Покровской Е.Н. [15], Посвятенко Ю.В. [16], Иванцыка Т.В. [17], Щербина Е.В. [18] и других.

В этой работе мы упомянем сохранившиеся здания православных храмов Курской области, построенные при использовании деревянных конструкций. В настоящее время нам известны находящиеся в Курской области два действующих храма постройки 19 века, в которых основные несущие конструкции изготовлены из древесины. Один из них – это храм во имя великомученика Георгия Победоносца в селе 3-е Уколово Золотухинского района, 1884 года постройки, второй – храм во имя Пресвятой Троицы в селе Винниково, 1843 года постройки.

Авторам довелось провести обследование здания 19 века постройки православного храма Пресвятой Троицы в селе

Винниково, который поражает сохранностью несущих конструкций, несмотря на отсутствие надлежащей эксплуатации и почти двухвековую свою историю. В настоящее время храм отнесён к объектам культурного наследия [19].

Краткая история здания (далее в тексте Храма) сведена в табл. 1, составленную на основании [20] и со слов местных жителей. Табл. 1 позволяет выделить периоды существования объекта, когда поддерживались приемлемые или близкие к оптимальным условия эксплуатации. В другие периоды, по всей видимости, этих условий не придерживались.

Материалы и методы

В июле 2013 г., после пожара в части здания, нами было проведено визу-

ально-инструментальное обследование с целью определения состояния несущих конструкций и возможности дальнейшей эксплуатации. По результатам обследования было составлено описание конструктивных и объёмно-планировочных решений Храма, составлена ведомость дефектов и повреждений и даны рекомендации по восстановлению конструкций.

Для освидетельствования конструкций фундаментов и грунтов, залегающих в основании Храма, силами Заказчика были выполнены три шурфа вблизи наружных и внутренних фундаментов.

Под подошвой фундамента, на глубине 0,90 – 1,25 м от поверхности земли в двух шурфах располагался гумусированный грунт, в третьем шурфе — пылеватый тугопластичный суглинок.

Таблица 1. Краткая история здания храма во имя Пресвятой Троицы в с. Винниково

Table 1. Brief history of the building of the temple in the name of the Holy Trinity in the village Vinnikovo

Период времени / Period of time	Использование здания Храма. Примечания / The usage of the church building. Notes
1843 г. – ноябрь 1940 г. На рис. 1а показана наиболее старая из найденных фотографий Храма	Использование по назначению. Дата строительства храма определена по косвенным данным. Возраст деревьев, посаженных вокруг храма, и впоследствии спиленных в 1952? был определён по годовым кольцам, он приблизительно указывал на 1843 год постройки здания. Храм был построен на средства местных помещиков. Приход храма – три села: Винниково, позже Отрешково, Липовец, Малиновый
Ноябрь 1940 г. – зима 1942 г.	Использование как склада зерна и сельскохозяйственного инвентаря
Зима 1942 г. – лето 1942 г.	Использование в качестве конюшни

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Период времени / Period of time	Использование здания Храма. Примечания / The usage of the church building. Notes
Лето 1942 г. – начало 1960-х г. На рис. 2 представлено изображение Храма предположительно 1950-х – 1960-х годов	Использование по назначению
Начало 1960-х – конец 1980-х гг.	Использование последовательно как склад минеральных удобрений, склад зерна, школьный спортивный зал. В этот период снесена колокольня
Конец 1980-х – начало 1990-х гг.	Не используется
Начало 1990-х – настоящее время. На рис. 3, 4, 5, 6 представлены изображения Храма 2000-2015 гг.	По назначению В начале 1990-х годов был произведён ремонт здания. Технические решения, применённые при ремонте, не обеспечили необходимой вентиляции деревянных конструкций. В частности, были заложены кладкой вентиляционные отверстия в цоколе здания и закрыт вентиляционный зазор между дощатой обшивкой и срубом. Зимой 2013 г. повреждены пожаром стены и кровля здания. В 2015 г. при проведении ремонта была изменена отделка фасадов и восстановлена внутренняя отделка. Облицовка здания пластиковым сайдингом поверх дощатой обшивки является одним из дешёвых технических решений, но по нашему мнению не способствует вентиляции конструкций и не соответствует статусу здания

Фундаменты Храма ленточные бутовые шириной 0,5 м с заглублением от 0,9 до 1,25 м от поверхности земли. Связующим материалом служит глиняно-известковая композиция.

В ленточных фундаментах оставлены ходы для осмотра полов снизу, также служащими для свободного движения воздуха в подполье. Камень, использованный при строительстве фун-

дамента – фосфорит («самород» – местное название), местной добычи. Этот камень использовался при мощении улиц и строительстве фундаментов. Упоминание об этом строительном материале имеется также в энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона. Фосфорит имеет чёрный цвет, глянцевитую бугристую поверхность, гидрофобен.



Рис. 1. а – наиболее старая из найденных фотографий Храма, датируемая предположительно 1940-е – до 1952 г.; б – изображение храма, предположительно 1950 – 1960 гг.; в – здание до пожара зимой 2013 г.; г – пожар здания в 2013 г.; д – ремонт здания в 2015 г. На одной части здания сохранилась деревянная дощатая обшивка, другая отделана пластиковым сайдингом; е – здание после ремонта. Фасад отделан пластиковым сайдингом серого цвета, маковка храма заменена

Fig.1. а - The oldest photograph of the Temple found, dated presumably from the 1940s to 1952; б - An image of the temple, presumably 1950 - 1960; в - Building before the fire in winter 2013; г - The fire in 2013; д - renovation of the building in 2015. One part of the building has retained the old plank finishing; the other is finished with plastic siding; е - The building after the renovation. The façade is finished with gray plastic siding; the dome top is replaced

Общая площадь помещений Храма – 204 м². Высота помещения алтарной части – 3,33 м, помещения нефа в центре – 11,45 м. Помещения притвора – 3,49 м, помещение топочной заглублено относительно уровня пола в смежном помещении на 0,6 м. План и разрез Храма приведены на рис. 2 и рис. 3.

Несущая конструкция стен по оси Г представляет собой сруб из дубовых брусьев сечением около 160х200 мм (рис. 3). Соединение брусьев на концах

выполнено на шип «ласточкин хвост», брусья уложены на слой клеевого раствора, толщиной до 2-3 мм. Стена прошпаклёвана тем же клеевым раствором. При освидетельствовании шпаклевка удалялась с брусьев со значительным усилием.

Обнаружены два слоя краски, которой были первоначально окрашены стены, тёмно-зелёного и светло-зелёного цвета. Видимо, в более позднее время на стену был наклеен слой овечьей шерсти, набита дрань и выполнена штукатурка.

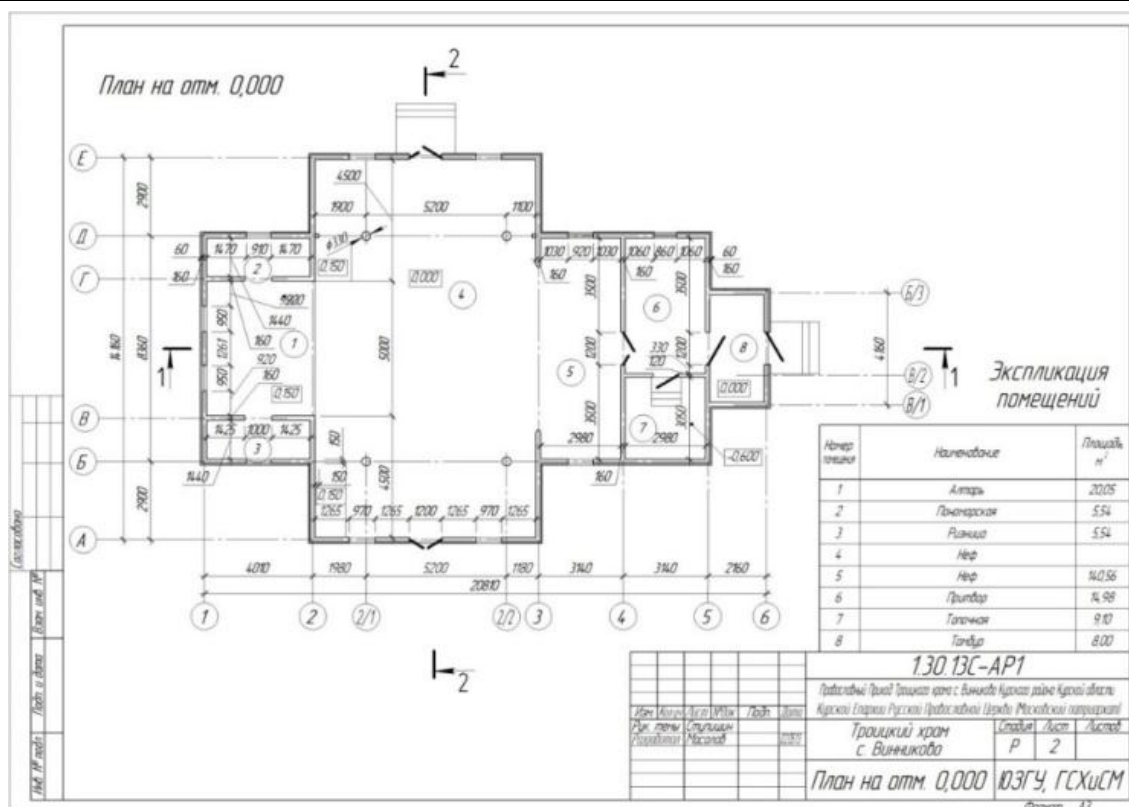


Рис. 2. План Храма

Fig. 2. Temple plan

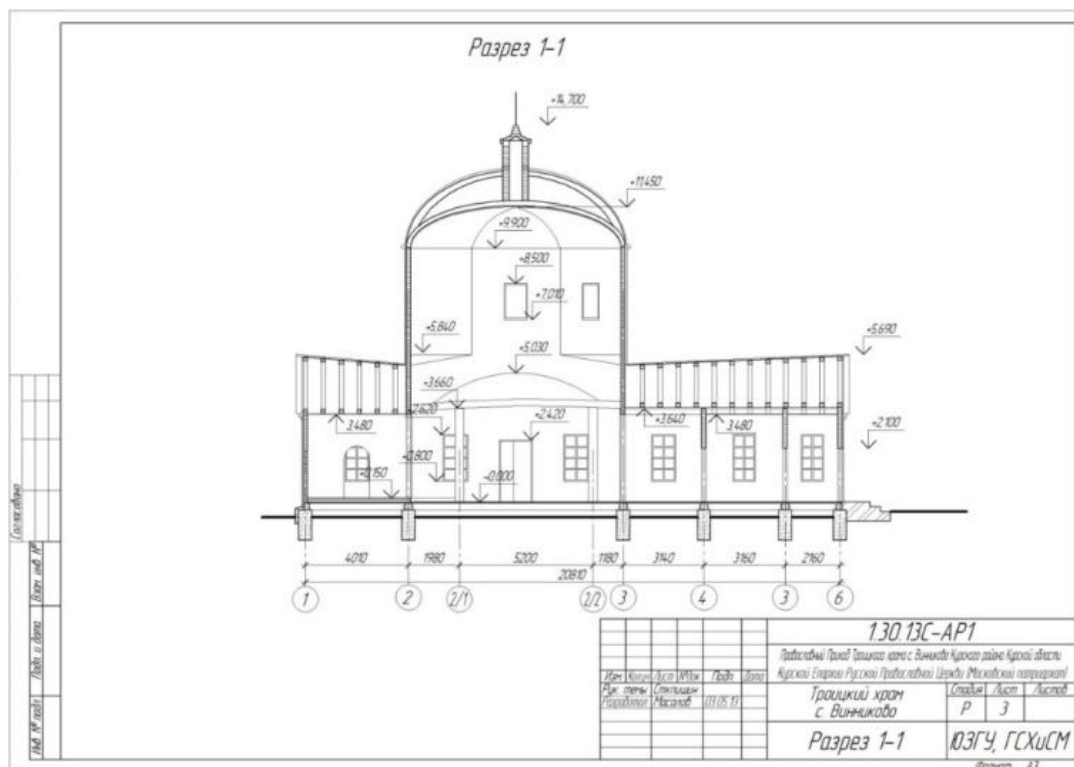


Рис. 3. Разрез Храма

Fig. 3. Temple cross-section



Рис. 4. Внутренняя стена Храма выполнена из бруса, отшпаклёвана, окрашена, затем оштукатурена по слою овечьей шерсти и драни. Видны следы окраски

Fig. 4. The inner wall of the Temple is made of timber, plastered, painted, then plastered over a layer of sheep's wool and lath. Visible traces of paint

Шерсть и штукатурка, вероятно, использовались для утепления и увеличения огнестойкости конструкций. Возможно, такая конструкция стены способствовала также лучшей акустике в помещении. На момент обследования и в настоящее время стены Храма изнутри полностью оштукатурены.

Стены барабана, так же, как и стены на нижних отметках, имеют срубную конструкцию, изготовлены из дубового бруса. Точность подгонки бру-

сьев в барабане значительно хуже (это видно на рис. 5) точности подгонки брусев на нижних отметках (это видно на рис. 4). Клеевой раствор не применялся, как в конструкции стены по оси Г.

Снаружи стены Храма обшиты окрашенной сосновой доской, толщиной 25 мм. Для крепления досок использовались кованые гвозди, прямоугольного поперечного сечения, длиной около 120 мм (рис.7).



Рис. 5. Сруб барабана. Конструкция дощатой обшивки

Fig. 5. The frame of the drum.
Construction of a board covering



Рис. 6. На отметках от 3,700 до 5,700 стены снаружи обшиты оцинкованным железом

Fig. 6. At the marks from 3,700 to 5,700, the walls are sheathed with galvanized iron from the outside

По причине усыхания древесины досок и пирамидальной формы стержня гвоздя (увеличения размера сечения гвоздя от острия к шляпке) гвозди сравнительно легко вынимаются из досок даже без использования инструментов. Обшивка доской выполнена по тёсаным рейкам. Эта конструкция обшивки фасада является прообразом современных навесных фасадов.

На отметках от 3,700 до 5,700 стены снаружи обшиты оцинкованным железом (см. рис. 6). На отметке около 0,800, в нижней части Храма имеются 12 окон, высотой 1,82 м, шириной 0,86 – 0,95 м. В барабанной части стен имеются слуховые окна (слухи) размером

около 0,9х1,4 м, выходящие на юг, юго-запад, север и северо-запад.

Полы дощатые, толщиной 50 мм по лагам из отёсанного дубового бревна высотой сечения 250-270 мм. Шаг лаг от 1250 до 1400 мм в алтарной части и около 900 мм в нефовой части. Стены по осям В и Г в алтарной части не имеют своих фундаментов, а опираются на балки-лаги. На участках между осями лаги опираются на дубовые стулья сечением около 250х250 мм (рис. 8). Стулья установлены нерегулярно, расстояние между ними около 3,5 – 4,5 м. В некоторых местах вместо дубовых стульев выложены столбики из фосфоритового камня (рис. 9).



Рис. 7. Для крепления досок обшивки использовались кованые гвозди

Fig. 7. Forged nails are used to fasten the sheathing boards



Рис. 8. На участках между осями лаги опираются на дубовые стулья

Fig. 8. In the areas between the axes, the logs are supported by oak chairs



Рис. 9. В некоторых местах лаги опираются на столбики из фосфоритового камня

Fig. 9. In some places, the logs are supported by columns of phosphorite stone

Кровля в осях А-Б, Д-Е, 1-2, 3-6 скатная, покрытая железом, в осях Б-Д-2-3 купольная кровля, также покрытая железом.

Результаты и их обсуждение

Глубина фундамента Храма от уровня земли по результатам обследования составила от 0,9 до 1,25 м, что прибли-

зительно соответствует принимаемой в настоящее время глубине промерзания грунта для места строительства – 1,2 м. Грунты, лежащие в основании здания, относятся к пучинистым. Здание в ранние годы эксплуатации, по всей видимости, не отапливалось, помещение топочной было организовано примерно в 1960-е – 1970-е годы. Меньшее значение глубины заложения фундамента на некоторых участках, против требуемого по современным нормам проектирования значения, не сказалось на величине осадок и на целостности конструкций. Поскольку несущая конструкция сруба и дощатая обшивка достаточно податливы, то по причине возможного неравномерного морозного пучения грунта повреждения стен не появились.

При строительстве фундамента использовали местный каменный материал – фосфорит, который обладает гидрофобными свойствами. Благодаря этому даже отсутствие гидрофобных материалов в местах опирания сруба не привело к развитию грибкового поражения древесины. То же можно сказать о фосфоритных столбиках, поддерживающих лаги.

До 50-х годов прошлого столетия, по словам очевидцев, здание не имело отмоксти, и сруб здания, опираясь на фундаменты, не касался грунта. Грибковые повреждения нижней обвязки сруба появились после сооружения отмоксти и забутовки промежутков между грунтом и нижней частью сруба.

Здание Храма по объёмно-планировочному решению относится к крестово-купольным храмам согласно класси-

фикации СП 31-103-99, Здания, сооружения и комплексы православных храмов. Крестово-купольный храм «имеет четыре столба в центре, на которые опираются подпружные арки, поддерживающие свод с куполом в световом барабане, переходом к которому служат паруса. В плане крестово-купольный храм образует пространственный крест». Такая конструкция обеспечивает свободное движение воздуха и равномерный температурный режим несущих конструкций в любое время года.

Сруб изготавливался вручную путём отёски дубовых брёвен. Точность изготовления сруба на разных участках стен сильно отличается. В наиболее нагруженных частях сруба более качественная обработка поверхности. Усадочные трещины древесины имеются в менее ответственных частях сруба.

В целях защиты сруба и теплоизоляционных мероприятий по срубам устраивалась обивка тёсаной доской, толщиной 25 мм по тёсаным дубовым планкам толщиной около 50 мм. Это прообраз нынешних вентилируемых фасадов.

В исходной отделке внутренних стен использовались неприменяемые ныне технологии и материалы, как и в связующем растворе фундамента. Они эффективно защищали конструкции здания уже несколько столетий.

Некоторые технические решения, применённые во время ремонтов, не способствуют сохранности деревянных конструкций и, по нашему мнению, не соответствуют статусу здания – объект

культурного наследия регионального значения.

Выводы

Здание Храма имеет каноническое крестово-купольное объёмно-планировочное решение, обеспечивающее хорошую аэрацию конструкций и стабильно однородный температурно-влажностный режим. Конструктивное решение обеспечивает равномерное перераспределение нагрузок между несущими конструкциями, позволяющее использовать строительные материалы различного качества.

Использование бутового фундамента на растворе, подобном глиняно-известковому, очевидно, наиболее рациональное техническое решение в постро-

енных условиях. Благодаря использованию местных материалов, эта технология, совмещающая в себе дешевизну с достаточными прочностными характеристиками.

В отделке внутренних стен применены неиспользуемые в настоящее время материалы и технологии, сочетающие в себе теплоизоляционные и гидрофобные свойства, а так же обеспечивающие сохранность древесины при неблагоприятных условиях эксплуатации.

Во время ремонтов применялись некоторые технические решения, которые приведут к постепенному разрушению древесины конструкций от дерево-разрушающих грибов.

Список литературы

1. Сморгачев А. А., Масалов А. В. Исследование прочности на сжатие длительно хранившейся древесины. Курск, 2019. 97 с.
2. Травуш, В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Длительная прочность и устойчивость сжатых стержней из древесины // Строительство и реконструкция. 2015. №5. С. 40-46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24395117>.
3. Травуш В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Устойчивость сжатых стержней из древесины при одновременном проявлении силового и средового воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. №2. С. 50-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26700902>.
- 4 Травуш В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Экспериментально-теоретическое исследование прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом и средовом воздействии // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. №3. С. 280-285. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26378375>
5. The buckling of the physically nonlinear frame-rod structural systems / K.O. Dubrakova, S.V. Dubrakov, F.V. Altuhov, D.H. Galaeva // 2019. IOP Conf.: Mater. Sci. Eng. 698 022007.

6. Yemelyanov S. G., Pakhomova E. G., Dubrakova K. O. Reliability of RC frame-braced systems in dangerous geological conditions // *Journal of Applied Engineering Science* Paper number: 17(2019)2, 602. P. 245 – 250. <https://doi.org/10.5937/jaes17-21685>.
7. Stability of statically indefinite physically nonlinear timber structural systems) / S. G. Yemelyanov, E. G. Pakhomova, K. O. Dubrakova, S. V. Dubrakov // *Journal of Applied Engineering Science*. Paper number: 17(2019)3, 622, 404 – 407. <https://doi.org/10.5937/jaes17-21686>.
8. Дубракова К.О. Вопросы устойчивости статически неопределимых систем из древесины // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. №11. С. 54-55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36380438>.
9. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26562057>.
10. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26703111>.
11. Масалов А.В., Солодилова В.А. Исследование влияния срока хранения древесины сосны на выносливость при сжатии вдоль волокон // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3):88-98. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-88-98>
12. Ступишин Л.Ю. Оценка состояния несущих конструкций зданий и сооружений: ресурс несущей способности конструкций с дефектами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 39-45.
13. Stupishin L.Yu., Masalov A.V, Altuhov F.V. Remote surveillance of shell structure load-bearing capacity // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. 15(3). P. 354-359. <https://doi.org/10.5937/jaes15-14655>
14. Assessing the state of building's foundations and residual lide of their bearing capacity. Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction Mangushev et al. / L.Yu. Stupishin, S.G. Emelyeanov, F.V. Altuhov, M.L. Moshkevich // (Eds), 2019. P. 363-367. <https://doi.org/10.1201/9780429058882>
15. Покровская Е.Н. Увеличение прочности частично разрушенной древесины памятников деревянного зодчества // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 11. С. 1305–1314. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1305-1314>
16. Посвятенко Ю.В. История строительства и реконструкции Ярославского вокзала в Москве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 8 (119). С. 912–923. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.8.912-923>

17. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 265–278. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.3.265-278>

18. Щербина Е.В., Белал А.А. Значение объектов исторического и культурного наследия при реконструкции и восстановлении городов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 417–426. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.417-426>

19. Перечень объектов культурного наследия регионального значения Курской области. С сайта администрации Курской области. URL: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=1154&mat_id=117664

20. Электронный ресурс «Горенка». URL: <https://gorenka.org/index.php/khramy-i-monastyri-kurskoj-obl/574-kurskij-r-n-s-vinnikovo>

References

1. Smorchkov A. A., Masalov A. V. *Issledovanie prochnosti na szhatie dlitel'no khranivsheysya drevesiny* [Investigation of long-stored wood compressive strength]. Kursk, 2019. 97 p.

2. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Dlitel'naya prochnost' i ustoichivost' szhatykh sterzhnei iz drevesiny [Long-term strength and stability of compressed wood rods]. *Stroitel'stvo i rekonstruccija = Building and Reconstruction*, 2015, no.5, pp. 40-46. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24395117>.

3. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Ustoichivost' szhatykh sterzhnei iz drevesiny pri odnovermennom proyavlenii silovogo i sredovogo vozdeistviya [Stability of compressed rods made of wood at the simultaneous appearance of power and environmental exposures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2016, no. 2, pp. 50-53. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26700902>.

4. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie prochnosti i ustoichivosti szhatykh sterzhnei iz drevesiny pri silovom i sredovom vozdeistvii [Experimental and theoretical research of durabilities and stability the squeezed cores from wood at power and environmental influence]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti = Textile Industry Technology*, 2016, no.3, pp. 280-285 (In Russ.), <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26378375>.

5. Dubrakova K.O., Dubrakov S.V., Altuhov F.V., Galaeva D.H. The buckling of the physically nonlinear frame-rod structural systems. 2019, IOP Conf.: Mater. Sci. Eng. 698 022007.

6. Yemelyanov S. G., Pakhomova E. G., Dubrakova K. O. Reliability of RC frame-braced systems in dangerous geological conditions. *Journal of Applied Engineering Science*. Paper number: 17(2019)2, 602, 245 – 250. <https://doi.org/10.5937/jaes17-21685>.

7. Yemelyanov S. G., Pakhomova E. G., Dubrakova K. O., Dubrakov S. V. Stability of statically indefinite physically nonlinear timber structural systems). *Journal of Applied Engineering Science*. Paper number: 17(2019)3, 622, pp. 404 – 407. <https://doi.org/10.5937/jaes17-21686>.

8. Dubrakova K.O. Voprosy ustoichivosti staticheskii neopredelimykh sistem iz drevesiny [The stability of statically indeterminate systems of wood]. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki = BST*. 2018, no.11, pp. 54-55. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36380438>.

9. Klyueva N.V., Dmitrieva K.O. Analiz ustoichivosti sterzhnevyykh konstrukttsii iz drevesiny pri silovom nagruzhenii i peremennoi vlazhnosti [Analysis of stability of rod structures of wood in force variable loading and humidity]. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura = Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2016, no.3, pp. 17-24. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26562057>.

10. Klyueva N.V., Dmitrieva K.O. Voprosy ustoichivosti sterzhnevyykh elementov konstruktivnykh sistem iz drevesiny razlichnykh porod pri silovom i sredovom nagruzhenii v usloviyakh povyshennoi vlazhnosti [Issues of sustainable rod elements design systems of different wood species in force and environmental loading moisture]. *Stroitel'stvo i rekonstrukcia = Building and Reconstruction*, 2016, no.5, pp. 60-68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26703111>

11. Masalov A.V., Solodilova V.A. Issledovanie vliyaniya sroka khraneniya drevesiny sosny na vynoslivost' pri szhatii vdol' volokon [Study of the influence of pine wood shelf life on endurance under compression along the grains]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2020; 24(3):88-98. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-88-98>

12. Stupishin L.Yu. Otsenka sostoyaniya nesushchikh konstrukttsii zdaniy i sooruzhenii: resurs nesushchei sposobnosti konstrukttsii s defektami [Evaluation of state of load-bearing constructions of buildings and structures. Resource of bearing capacity of structures with defects]. *Stroitel'stvo i rekonstrukcia = Industrial and Civil Engineering*, 2017, no.10, pp.39-45.

13. Stupishin L.Yu., Masalov A.V., Altuhov F.V. Remote surveillance of shell structure load-bearing capacity. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, no.15(3), pp 354-359 (In Russ.). <https://doi.org/10.5937/jaes15-14655>

14. Stupishin L.Yu., Emelyanov S.G., Altuhov F.V., Moshkevich M.L. Assessing the state of building's foundations and residual load of their bearing capacity. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction - Mangushev et al. (Eds)*, 2019, pp. 363-367. <https://doi.org/10.1201/9780429058882>

15. Pokrovskaya E.N. Uvelichenie prochnosti chastichno razrushennoi drevesiny pamyatnikov derevyannogo zodchestva [Increase of strength of partially destroyed wood of monuments of wooden architecture]. *Vestnik MGSU*, 2018; 13:11:1305–1314 (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1305-1314>
16. Posvyatenko Yulia V. Istoriya stroitel'stva i rekonstruktsii Yaroslavskogo vok-zala v Moskve [The history of the construction and reconstruction of the Yaroslavsky station in Moscow]. *Vestnik MGSU*, 2018, vol. 13, is. 8 (119), pp. 912–923. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.8.912-923>
17. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. Ograda usad'by Musinykh-Pushkinykh v Moskve po materialam istoriko-arkhitekturnykh i naturnykh issledovaniy [The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies]. *Vestnik MGSU*, 2021; 16(3):265-278. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.3.265-278> (rus.).
18. Shcherbina E.V., Belal A.A. Znachenie ob"ektov istoricheskogo i kul'turnogo naslediya pri rekonstruktsii i vosstanovlenii gorodov [The value of historical and cultural heritage in the reconstruction and restoration of cities]. *Vestnik MGSU*. 2019; 14(4):417-426. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.417-426> (rus.).
19. *Perechen' ob"ektov kul'turnogo naslediya regional'nogo znacheniya Kurskoi oblasti* [List of cultural heritage sites of regional significance of the Kursk region. Site of the administration of the Kursk region]. Available at: https://adm.rkursk.ru/index.php?id=1154&mat_id=117664.
20. [Electronic resource «Gorenka»]. Available at: <https://gorenka.org/index.php/khramy-i-monastyri-kurskoj-obl/574-kurskij-r-n-s-vinnikovo> (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Ступишин Леонид Юлианович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: masalow.al@ya.ru

Leonid Y. Stupishin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Structural Mechanics Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, e-mail: masalow.al@ya.ru

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

Alexander V. Masalov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Civil Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: masalow.al@ya.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69>



Организация промышленного строительства АЭС на глобальном рынке с учетом моделирования надежности на прединвестиционных этапах

В.В. Березка¹, С.А. Баронин² ✉, В.В. Бредихин³, А.В. Зобнев²

¹ Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, д.26, г. Москва 109377, Российская Федерация

² Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
ул. Германа Титова, д.28, г. Пенза 440028, Российская Федерация

³ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: baron60@inbox.ru

Резюме

Исследована проблематика управления организационной надежностью прединвестиционной фазы промышленного строительства АЭС на глобальных рынках. Актуальность тематики определяется большой неопределенностью при реализации международных инвестиционных проектов АЭС. Это подтверждают факты задержек сроков строительства и увеличение затрат более чем на 60% строящихся атомных реакторов в мире.

Цель исследования: разработка методических подходов и практических рекомендаций по моделированию и комплексному управлению показателями организационной надежности промышленного строительства АЭС на глобальном рынке на прединвестиционных этапах.

Методы. Комплекс системных методических подходов, базирующихся на методах сравнения, анализа, синтеза, моделирования, прогнозирования, экспертных оценок, математической статистики, экономико-математического моделирования, факторного, ситуационного и ретроспективного анализа, метода сценариев, морфологического и логического анализа.

Результаты: авторская методика по моделированию организационной надежности и структуры жизненного цикла промышленного строительства АЭС; особенности и тренды развития данного типа промышленного строительства; рекомендации в области организации промышленного строительства по увеличению надежности возведения АЭС на основе управляемого факторного пространства и многокритериальной оптимизации календарных план-графиков.

Заключение. Выполненные исследования подтвердили актуальность изучения предмета исследования, связанного с решением проблемы повышения организационной надежности промышленного строительства АЭС на глобальных рынках, формируемой и управляемой на прединвестиционных этапах планирования данных типов инвестиционных проектов. При этом основным итогом данных исследований можно считать повышение конкурентоспособности российских дивизионов ГК «Росатом» на международном рынке с увеличением ее текущей доли в 26% (130 млрд.долл.США) до 40-50% на период до 2035 гг.

Ключевые слова: промышленное строительство; организация строительства; организационная надежность; строительство АЭС; глобальные рынки; жизненные циклы; интенсивность строительства; безотказность.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00567.

Для цитирования: Организация промышленного строительства АЭС на глобальном рынке с учетом моделирования надежности на прединвестиционных этапах / В. В. Березка, С.А. Баронин, В.В. Бредихин, А. В. Зобнев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 56-69. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69>.

Поступила в редакцию 02.08.2021

Подписана в печать 25.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Organization of Industrial Construction of Nuclear Power Plants in the Global Market, Taking into Account Reliability Modeling at Pre-investment Stages

Vitaly V. Berezka ¹, Sergey A. Baronin ² ✉, Vladimir V. Bredikhin ³,
Anton V. Zobnev ²

¹ Moscow State University of Civil Engineering,
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow 109377, Russian Federation

² Penza State University of Architecture and Construction
28 German Titov str, Penza 440028, Russian Federation

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

✉ e-mail: baron60@inbox.ru

Abstract

The problems of managing the organizational reliability of the pre-investment phase of the industrial construction of nuclear power plants in global markets have been investigated. The relevance of the topic is determined by the great uncertainty in the implementation of international investment projects of nuclear power plants. This is confirmed by the facts of construction delays and an increase in costs by more than 60% of nuclear reactors under construction in the world.

Purpose of research: development of methodological approaches and practical recommendations for modeling and integrated management of organizational reliability indicators of industrial construction of nuclear power plants in the global market at pre-investment stages.

Methods: a set of systematic methodological approaches based on methods of comparison, analysis, synthesis, modeling, forecasting, expert assessments, mathematical statistics, economic and mathematical modeling, factorial, situational and retrospective analysis, scenario method, morphological and logical analysis.

Results: the author's methodology for modeling organizational reliability and the structure of the life cycle of industrial construction of nuclear power plants; features and development trends of this type of industrial construction; recommendations in the field of industrial construction organization to increase the reliability of NPP construction based on a controlled factor space and multi-criteria optimization of calendar schedules.

Conclusion. The studies performed have confirmed the relevance of studying the subject of research associated with solving the problem of increasing the organizational reliability of industrial construction of nuclear power plants in global markets, formed and managed at the pre-investment stages of planning these types of investment projects. At the same time, the main result of these studies can be considered as an increase in the competitiveness of the

Russian divisions of Rosatom State Corporation in the international market with an increase in its current share of 26% (130 billion US dollars) to 40-50% for the period up to 2035.

Keywords: industrial engineering; construction organization; organizational reliability; nuclear power plant construction; global markets; life cycles; construction intensity; reliability.

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

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR grant within the framework of the scientific project No. 18-08-00567.

For citation: Berezka V. V., Baronin S. A., Bredikhin V. V., Zobnev A. V. Organization of Industrial Construction of Nuclear Power Plants in the Global Market, Taking into Account Reliability Modeling at Pre-investment Stages. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 56-69 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69).

Received 02.08.2021

Accepted 25.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

Перспективным направлением развития отечественных атомно-энергетических компаний России является участие на международном рынке промышленного строительства АЭС. Задача «увеличения экспортного потенциала» промышленного строительства АЭС сталкивается с проблемой недостаточной надежности их реализации из-за нарушения сроков строительства АЭС и превышения контрактной стоимости, что во многом объясняется наличием высоких организационных рисков, преимущественно не учтенных на предпроектной фазе.

В этой связи, особо актуальной является проблема развития методов увеличения на глобальном рынке промышленного строительства АЭС российской доли инвестпроектов, обладающих повышенной конкурентоспособностью за счет повышения организационной надежности данного вида ин-

вестпроектов, формируемой на предпроектной фазе.

В качестве объекта исследования приняты объекты промышленного строительства крупномасштабных технически сложных инвестиционных мега-проектов АЭС Госкорпорации «Росатом» на глобальном рынке атомно-энергетического строительства, а также аналогичные объекты прочих застройщиков в различных странах мира.

В настоящее время атомная энергетика является одной из наиболее масштабных отраслей. В последнее десятилетие мировой рынок строительства атомных станций сместился в сторону стран третьего мира¹. Развивающиеся страны, как правило, испытывают недо-

¹ Коптелов М.В. Совершенствование методов определения экономической эффективности инвестиционных проектов строительства объектов использования атомной энергии за рубежом с учетом оценки рисков : дис. ... канд. экон. наук. М., 2017. 191 с.

статок собственных средств на строительство атомных энергоблоков [1].

В истории международного строительства АЭС принято выделять три эшелона стран-поставщиков ядерных технологий¹. К первому эшелону относятся государства, начавшие развитие мирной атомной отрасли в 1950-60-е гг. Это США, Великобритания, СССР и Канада. Позже к ним присоединились страны второго эшелона: Германия, Япония, Франция, Швеция, Чехия, Италия. В последние пятнадцать лет появились новые импортеры ядерных технологий – Южная Корея и Китай (третий эшелон) [2].

Реализация проектов сооружения АЭС за рубежом относится к категории крупных сложных инвестиционно-строительных проектов, для которых характерны [3]: масштабные инвестиции (до 30 млрд. долл. США); продолжительные сроки реализации (10-15 лет на проектирование, строительство и запуск, а также 60-летний срок эксплуатации).

В диссертационной работе Леонтьева Н.Я.² представлено исследование по конкурентоспособности инжиниринговых компаний атомного строительства.

¹ Коптелов М.В. Совершенствование методов определения экономической эффективности инвестиционных проектов строительства объектов использования атомной энергии за рубежом с учетом оценки рисков : дис. ... канд. экон. наук. М., 2017. 191 с.

² Леонтьев Н.Я. Методология формирования конкурентоспособности инжиниринговых компаний атомной отрасли: дис. ... д-ра экон. наук. Нижний Новгород, 2019.

Кроме того, повышение эффективности и качества оказания услуг является важным условием продвижения отечественного оборудования атомной энергетики на мировой рынок³. Задача «увеличения экспортного потенциала» атомной энергетики зафиксирована в документах Минэкономразвития [4] и в Энергетической стратегии России, как нынешней до 2030 г.⁴, так и в разрабатываемом проекте до 2035 г.

Ряд исследований, выполненных отечественными российскими учеными [5], выявили проблемные аспекты реализуемости проектов промышленного строительства АЭС (систематическое превышение сроков строительства, размера инвестиций, достигающие до нескольких десятков или даже сотен процентов). Необходимо отметить, что согласно российской практике, зона ответственности генерального подрядчика на сооружение АЭС отличается от принятой в зарубежной практике зоны ответственности ЕРСМ-компании [6].

Установлено, что международные строительные проекты более уязвимы для споров, возникающих из-за таких факторов, как различия в правовом регулировании контрактов, культурные особенности, языковые барьеры, и тех-

³ Рогозянский Д.О. Организационно-экономический механизм повышения эффективности продвижения энергетического оборудования на мировой рынок : автореф. дис. ... канд. экон. наук: М., 2007. 21 с.

⁴ Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утв. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р.

нические стандарты [7]. Наличие рисков всегда приводит к спорам и конфликтам данного вида промышленного строительства [8], которые имеют разный тип проявления.

В статье отечественных ученых Соловьевой А.П., Харитоновой В.В., Шмакова О.Г. [9] приведена авторская модель для расчета потерь эффективности инвестиций в АЭС при задержках их ввода в эксплуатацию. В работе Мухаммеда Муфазсала Хоссена, Санку Канг и Чонхюн Ким [10] была разработана методика оценки организационного риска отставания от графика строительства АЭС и проведена оценка этого риска в международных проектах АЭС «под ключ». Анализ показывает, что отставание от графика строительства может быть недопустимым с точки зрения недополученных доходов и процентов на капитальные затраты [11].

Перерасход бюджета и отставание от графика по проектам промышленного строительства АЭС нового поколения в последние годы дают понять, что в атомной промышленности до сих пор используются неудачные и устаревшие методы управления и контроля строительства проектов АЭС [12]. Если сроки завершения проекта откладываются на год, полная приведенная стоимость электроэнергии увеличивается примерно на 8-10% [13].

Ряд собственных исследований авторов также продемонстрировали важность формализации процессов моделирования и управления организационны-

ми рисками прединвестиционной фазы сооружения объектов атомной энергии на международном рынке промышленного строительства АЭС [14-16]. Весьма ключевым вопросом является структурирование российских стратегий продаж проектов АЭС на международном рынке [17], а также анализ проблематики выявления особенностей управления проектами и рисками подрядчика при промышленном строительстве в зарубежных странах [18].

Весьма перспективным следует считать направление оценки стоимости жизненных циклов объектов капитального строительства с позиции оценки стоимости владения для конечных потребителей [19, 20]. Использование этого принципа относительно оценки стоимости владения жизненными циклами АЭС, включая не только этап девелопмента, но и стадию эксплуатации, с учетом специфики атомного строительства за рубежом [18]. Формирование инновационных российских стратегий продаж инвестиционно-строительных проектов сооружения АЭС на глобальных рынках, как показал проведенный анализ [21], несомненно является приоритетной задачей организации эффективного промышленного строительства.

Материалы и методы

Экспертные исследования позволили установить, что ключевыми критериями организационной надежности проектов промышленного строительства АЭС является безотказность организационных

решений проектов АЭС по соблюдению сроков и стоимости строительства, принятых на ранних прединвестиционных этапах жизненного цикла (ЖЦ).

Разработка методики предусматривает приоритет положения о важности контроля организационной надежности промышленного строительства по индексам безотказности на основе соблюдения как сроков, так и стоимости строительства. Одновременный учет этих двух факторов безотказности идентифицируется в исследовании как интенсивность строительства. Это предопределяет необходимость моделирования надежности как организационной надежности (ОРН) по критерию интенсивности СМР.

С позиций сущностного понимания ОРН как безотказности интенсивности промышленного строительства по i - j стадиям ЖЦ, следует отметить ее как систему взаимного соответствия критериев надежности, имеющую начальную точку отсчета, равную единице, с последующим ее рассеиванием под действием отказов организационного типа.

В наиболее общем виде расчетная методическая схема данного подхода формализации $ОРН_{i-j}$ по стадиям $ЖЦ_{i-j}$ может иметь следующий вид с целевой функцией минимизации величины отклонений $\Delta ОРН_{i-j}$ до минимально возможных значений:

$$\begin{aligned} &ОРН_i^0[ЖЦ_i^0] \rightarrow ОРН_{i+1}[ЖЦ_{i+1}] \rightarrow \\ &\rightarrow ОРН_{i+2}[ЖЦ_{i+2}] \rightarrow \dots ОРН_{i-j}[ЖЦ_{i-j}] \rightarrow \\ &\rightarrow \Delta ОРН_{i-j}(\min). \end{aligned} \quad (1)$$

К специфике расчетной модели следует отнести тот факт, что на ранних

прединвестиционных этапах согласно методике ЮНИДО в таких документах как предварительное ТЭО, ТЭО, расчет как продолжительности, так и контрактной стоимости, в большинстве случаев, является предварительным и подлежит уточнению на стадии заключения окончательного контракта и этапа разработки и утверждения проекта в рамках раздела ПОС. Учитывая эти обстоятельства, расчетная методическая схема $ОРН_{i-j}$ по стадиям $ЖЦ_{i-j}$ может иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} &ОРН_{ТЭО}[ЖЦ_{i-1}^{ТЭО}] \rightarrow ОРН_i^0[ЖЦ_i^0] \rightarrow \\ &\rightarrow ОРН_{i+1}[ЖЦ_{i+1}] \rightarrow \dots ОРН_{i-j}[ЖЦ_{i-j}] \rightarrow \\ &\rightarrow \Delta ОРН_{i-j}(\min). \end{aligned} \quad (2)$$

Разработанная методика предполагает моделировать показатель $ОЭН_{i-j}$ по критерию интенсивности через две основные составляющие.

Во-первых, это организационная надежность первого типа ($ОН_{i-j}(I)$) по соблюдению принятых сроков календарных графиков строительства (T_i^o) в жизненных циклах возведения АЭС как системы взаимного соответствия принятых решений по T_i^o на более поздних этапах $ЖЦ_j$ относительно более ранних $ЖЦ_i$. Любое положительное или отрицательное отклонение по срокам строительства приводит к уменьшению $ОН_{i-j}$.

В качестве дополнительного индекса организационной надежности предлагается использовать также данные по соотношению построенных энергоблоков АЭС без задержки (N^+) к их общему количеству (N_0) на определенный рас-

четный период и дату. В этом случае $ОН_n$ определяется следующим образом:

$$ОН_n = N^+ / N_0. \quad (3)$$

Данный тип ОН также характеризует вероятность безотказности строительства энергоблоков АЭС, но только не по величине отклонения от графика, а сам факт наличия такого отказа. В виду сложности сбора статистики данный показатель также интересен для применения.

Во-вторых, это организационная надежность второго типа ($ОН_{i-j}(2)$) по соблюдению принятых показателей стоимости строительства (S^0_i) в жизненных циклах возведения АЭС как системы взаимного соответствия принятых решений по S^0 на поздний этапах ЖЦ_j относительно более ранних ЖЦ_i.

Этот авторский теоретический подход можно проиллюстрировать ниже следующей формулой:

$$ОРН_{i-j} = ОН_{i-j}(1) \times ОН_{i-j}(2), \quad (4)$$

$$\text{где } ОН_{i-j}(1) = T^{i-j}_{пл} \times [1/T^{i-j}_{пл} + \Delta T^{i-j}_{отк}] = T^i \times [1/T^j + \sum \Delta_{1,2} T^j_{отк}]; \quad (5)$$

$ОН_{i-j}$ – организационная надежность решения по продолжительности строи-

тельства, определяемая согласно расчетной схеме, показанной на рис.1.

Расчетная схема идентификации отказов по продолжительности строительства предусматривает выделение двух типов отклонения фактических сроков на j -этапе от запланированного на предшествующем j -этапе: 1. Отказы относительно точки начала календарного графика - $\Delta_1 T^j_{отк}$; 2. Отказы относительно точки окончания календарного графика - $\Delta_2 T^j_{отк}$.

Вторая составляющая $ОН_{i-j}$ по $ОН_{i-j}(2)$ на основе контроля отказов по величине отклонений стоимости в методическом отношении определяется аналогичным образом.

$$ОН_{i-j}(2) = S^i_{ох} [1/S^j_{пл} + \Delta S^j_{отк}] = S^i/S^j = S^i_{пл} \times [1/S^i_{пл} + (S^j - S^i_{пл})]. \quad (6)$$

При этом стоимость (S_i) на i -этапе одновременно является как базовой, нулевой (S^0_i), так и плановой ($S^i_{пл}$).

$$S_i = S^0_i = S^i_{пл}. \quad (7)$$

Формула $ОН(2)_{i-j}$ применима при условии, когда S^j больше или равно S^i .

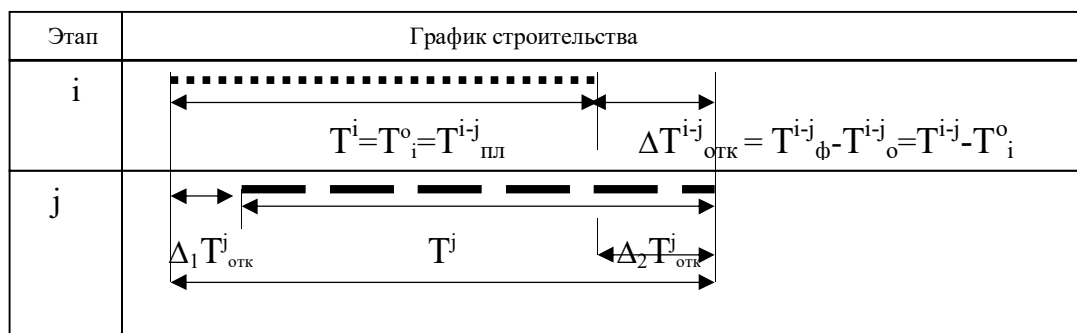


Рис.1. Расчетная схема определения параметров организационной надежности $ОН_{i-j}(1)$ по этапам ЖЦ_{i-j} на основе идентификации отказов по продолжительности строительства

Fig. 1. Calculation scheme for determining the parameters of organizational reliability $ОН_{i-j}(1)$ by stages of life cycle $i-j$ based on the identification of failures by the duration of construction

Результаты и их обсуждение

Анализ проблематики организационной надежности промышленного строительства по проектам АЭС на глобальном рынке по критерию отставания от плановых сроков строительства, показал, что из 52 строящихся блоков АЭС на 01.07.2020, с опозданием принятых ранее сроков построены 33 блока или 63,5%.

Выполненное исследование организационной надежности по критерию наличия отставания от плановых сроков ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС на основании открытых данных Международного энергетического агентства (МЭА), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Всемирной атомной ассоциации, Агентства по атомной энергии (ОЭСР), показало, что для дивизионов ГК «Росатом» характерны относительно высокая надежность выполнения запланированных ранее графиков строительства. Так, по показателю $ОН_n$ организационная надежность для энергоблоков России составляет 0,67. Россию опережает на 01.07.2020 только Великобритания и Бангладеш с единичным показателем. Организационная надежность для Китая равна – 0,6, у Турции и Пакистана – 0,5, Индия – 0,29. В таких странах, как Южная Корея, ОАЭ, Беларусь, Словакия, США, Аргентина, Иран и Япония, организационная надежность весьма низкая, поскольку все энергоблоки строятся с задержкой.

Данный показатель $ОН_n$ дает определенную локальную картину органи-

зационной дисциплины строительства АЭС, но не претендует на свою исключительность и требует дополнительных параметров для проведения более комплексного анализа.

Анализ открытых данных МАГАТЭ¹ показал, что средняя продолжительность строительства энергоблоков АЭС составил десять лет за анализируемый период 2009-2019гг. на примере выборки из 63 строящихся энергоблоков АЭС. Минимальные сроки в Южной Корее и Китае – 4,1 года, Пакистане – 5,2 года. Для России эти показатели составляют 20,3 года – средние, минимальные – 8,1 года, максимальные – 35,1 года. Значительные сроки строительства в США (43,5 года).

Существует четкая глобальная тенденция к увеличению сроков строительства АЭС, связанная с ужесточением правил их безопасности. Так за 1980-1990 годы средний срок составлял около 8 лет. Полученные результаты за последние годы имеют средние значения в 10 лет и весьма вариативны.

Девять энергоблоков, завершенных в 2018-2019 годах китайской атомной промышленностью, заняли в среднем 7,6 года на строительство, в то время как пять российских проектов заняли в среднем 16 лет от первого начала строительства до подключения к сетям, а Ростов-4 – 35 лет от начала строительства до окончательной выработки электроэнергии. Анализ соблюдения сроков

¹ <https://prisweb.iaea.org/Home/Pris.asp>

строительства показал, что в среднем величина задержек сроков составляет не менее 50% от запланированных ранее. Можно утверждать, что короткие сроки промышленного строительства АЭС остаются исключениями.

Интервал удельной стоимости капитальных затрат (overnight) на зарубежном рынке строительства АЭС находится в диапазоне 6500-12250 дол. США за 1 КВт установленной атомной мощности, вариативна по странам, имеет тенденцию снижения, поскольку должна быть конкурентоспособна с альтернативными источниками энергии.

Ограниченный и закрытый характер информации относительно плановых и фактических значений стоимости и сроков строительства АЭС в разных странах создает сложности в апробации предложенной ранее методики ОРН. В этой связи авторами разработана экспертно-аналитическая всеерная модель графика ОРН.

Установлено, что все сегменты рынка можно условно разделить на 3 группы: А – высоконадежные проекты строительства с показателями $ОРН_{1-3}$ от 1,0 до 0,9. Как правило, для таких проектов организационная надежность $ОН(1)_{1-3}$ по срокам может соблюдаться с единичным показателем, а $ОН(2)_{1-3}$ величина отказов по стоимости в пределах 20%. Это предопределяет среднюю величину $ОРН_{1-3}$ в пределах 80% или 0,8; В – надежные проекты с $ОРН_{1-3}$ от 0,79 до 0,50; С – проекты низкой надежности с $ОРН_{1-3}$ от 0,49 до 0,20; D – проекты критической надежности – менее 0,20.

Анализ показателей $ОН(2)_{i-j}$ показал, что их средние величины всегда изменяются даже при высоких индексах организационной надежности. Так для проектов в высокой организационной зоне надежности А, когда $ОН(1)_{1-2}=1,0$, происходит изменение стоимости проекта, связанное, как минимум, с процессами инфляции и неучтенными факторами затрат.

Расчеты ОРН применительно к ряду атомных станций советского периода показали, что в группе А с наилучшими показателями строительства вошли Запорожская и Балаковская АЭС. Для них получены итоговые показатели $ОРН_{1-3}$, равные 0,60. При этом для второй группы АЭС (Калининская, Хмельницкая, Ростовская и Южно-Украинская) этот показатель составил 0,34. Полученные графики изменения данных показателей демонстрируют значительное рассеивание единичных базовых показателей до неудовлетворительных зон надежности.

Применительно к текущему периоду функционирования глобального рынка строительства АЭС имеется возможность оценить ОРН только по локальным показателям организационной надежности типа $ОН_n$, рассчитанных ранее, и среднестатистическому индексу $ОН(2)_{1-3}$ в 0,8. Это позволило получить следующие группы организационной надежности стран-заказчиков глобального рынка в порядке убывания на 01.07.2020: Великобритания и Бангладеш – 0,8 (тип А – высоконадежные); Россия, Китай – 0,5 (тип В – надежные

проекты); Турция, Пакистан – 0,4 (тип С – проекты низкой надежности).

Апробация данной методики в виду трудности сбора ряда данных носит экспериментальный характер. Интерпретация полученных результатов, как и содержание самой методики требует своего творческого развития и не претендует на завершенность.

Выводы

Выполненные исследования подтвердили важность авторского направления научно-практических работ в области разработки методических подходов и практических рекомендаций по моделированию и комплексному управлению на прединвестиционных этапах интегрированными показателями организационной надежности промышленного строительства ЭС.

Установлено, что попытка синтезировать показатель организационной надежности промышленного строительства по интенсивности жизненного цикла АЭС представляет научно-практический интерес.

Проблематика роста конкурентоспособности российских строительных дивизионов госкорпорации «Росатом» за рубежом предполагает необходимость увеличения ее текущей доли с 26% (130 млрд.долл.США) до 40-50% на период до 2035 гг. В этой связи, концепция и методика обеспечения роста организационной надежности промышленного строительства АЭС по их срокам и стоимости являются важнейшим аспектом формирования конкурентных преимуществ.

В качестве дискуссионного вопроса методики следует отметить необходимость внесения в нее корректировок применительно к стандартам конкретного корпоративного пользователя и специфики стран-заказчиков.

Значимость исследуемой проблематики для Российской экономики подтверждает тот факт, что текущий российский портфель заказов строительства АЭС на международном рынке весьма значителен. Его величина почти в 2,5 раза превышает аналогичный портфель экспортных заказов на продукцию российского оборонно-промышленного комплекса (в 2020 году – \$53,8 млрд.).

Список литературы

1. Kobrin S.J. The determinants of liberalisation of FDI policy in developing countries: A cross-sectional analysis. N.Y.: Transnat. corp., 2005. Vol. 14, N 1. P. 67-98.
2. Трансмутации рынка АЭС // Атомный эксперт. 2013. №8(17). С. 10-17.
3. Информация о состоянии атомной промышленности от Международного Агентства по Атомной Энергии (IAEA). URL: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-plant-life-cycle> (дата обращения: 01.07.2021).
4. Основные направления развития экспорта на период до 2030 года (проект) / Минэкономразвития России. 2015. URL: <http://economy.gov.ru/minec/about/structure/depSvod/2015020513> (дата обращения: 01.07.2021).

5. Соловьева А.П., Харитонов В.В., Шмаков О.Г. Влияние задержек в строительстве АЭС на эффективность инвестиций // Атомные электростанции. 2018. №52.
6. Официальный сайт Государственной корпорации «Росатом». URL: <https://rosatom.ru/production/design/stroyashchiesya-aes/> (дата обращения: 01.07.2021)
7. Liu F., Jin Q., Xie M. Skitmore, Improving risk assessment in financial feasibility of international engineering projects: a risk driver perspective // Int. J. Proj. Manag. 2017. 35 (2).
8. Experience mining based on case-based reasoning for dispute settlement of international construction projects / J. Liua, H. Lia, M. Skitmoreb, Y. Zhanga // Automation in Construction. January 2019. Vol. 97.
9. Соловьева А.П., Харитонов В.В., Шмаков О.Г. Влияние задержек в строительстве АЭС на эффективность инвестиций // Известия вузов- Ядерная энергетика. 2018. №3. С. 52-62 S05.pmd (nuclear-power-engineering.ru).
10. Мухаммед Муфазсал Хоссен, Санку Канг, Чонхюн Ким. Оценка риска отставания от графика строительства с использованием комбинированной методики АНР-РП в международных проектах по строительству атомных электростанций (АЭС) // NuclEngTechnol. 2015. 47. P. 362-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2014.12.019>.
11. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Серия изданий по ядерной энергии №NP-T-2.7 // Управление проектами в строительстве АЭС: руководящие принципы и опыт. Вена, 2012.
12. KPMG International. Риск незавершения строительства в новых проектах по строительству АЭС (Construction Risk in New Nuclear Power Projects) — Eyes Wide Open, 2011. URL: kpmg.com/infrastructure.
13. Сметы для сектора атомной энергетики Великобритании / Дж. Харрис, П. Хепностал, Р. Гросс, Д. Хэндли // EnergyPolicy. 2013. 62. P. 431-442.
14. Грабовый П.Г., Березка В.В. Моделирование управления рисками прединвестиционной фазы сооружения объектов атомной энергии на международном рынке строительства АЭС // Недвижимость: экономика и управление. 2021. №1. С. 6-16.
15. Грабовый П.Г., Березка В.В. Управление организационно-технологическими (операционными) рисками российских подрядчиков при сооружении АЭС за рубежом // Недвижимость: экономика и управление. 2019. №3. С. 6-17.
16. Chernyakhovskaya Y.V., Berezka V.V. Russian business strategy and tactics on the world market of NPP construction (economic system) // Proceedings of the International Scientific Conference "Far East Con". Atlantis Press, 2020. Vol. 128.
17. Grabovy P., Berezka V.. Determining the Reasonable Degree of Specialization of Russian Companies Participating in NPP Construction Abroad // Proceedings of XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: "FORM-2020". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869.
18. Березка В.В., Roehrl A. Особенности управления проектами и рисками подрядчика при осуществлении строительства в зарубежных странах // Недвижимость: экономика и управление. 2019. №1. С. 13-18.

19. Baronin S.A., Yankov A.G., Bizhanov S.A. Assessing the cost of real estate lifecycle contracts in Russia's present-day economy and the characteristics of the European experience // *Life Science Journal*. 2014. 11(8s). P. 249-253.

20. Kulakov K.Y., Baronin S.A. Modeling total cost of ownership residential real estate in the life cycles of buildings // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*. October 2018. Vol. 9, is. 10, , P. 1140-1148.

21. Черняховская Ю.В., Березка В.В. Российская стратегия продаж инвестиционно-строительных проектов сооружения АЭС (экономических систем) на международном рынке // *Недвижимость: экономика и управление*. 2019. №2. С. 53-60.

References

1. Kobrin S.J. The determinants of liberalization of FDI policy in developing countries: A cross-sectional analysis. N.Y. : Transnat. corp., 2005, vol. 14, no. 1, pp. 67-98.

2. Transmutatsii rynka AES [Transmutation of the NPP market]. *Atomnyi ekspert = Atomic Expert*, 2013, no. 8 (17), pp. 10-17.

3. Informatsiya o sostoyanii atomnoi promyshlennosti ot Mezhdunarodnogo Agentstva po Atomnoi Energii (IAEA) [Information on the state of the nuclear industry from the International Atomic Energy Agency (IAEA)]. Available at: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-plant-life-cycle> (date of access: 01.07. 2021).

4. *Osnovnye napravleniya razvitiya eksporta na period do 2030 goda (proekt)* [Main directions of export development for the period up to 2030 (draft)]. Available at: <http://economy.gov.ru/minrec/about/structure/depSvod/2015020513> (access date: 07/01/2021).

5. Solovyova A.P., Kharitonov V.V., Shmakov O.G. Vliyanie zaderzhek v stroitel'stve AES na effektivnost' investitsii [Impact of delays in NPP construction on investment efficiency]. *Atomnye elektrostantsii = Nuclear Power Plants*, 2018, no. 52.

6. *Ofitsial'nyi sait Gosudarstvennoi korporatsii «Rosatom»* [Official website of the State Corporation "Rosatom". Available at: <https://rosatom.ru/production/design/stroyashchiesya-aes/> (date of access: 01.07.2021).

7. Liu F., Jin Q., Xie M. Skitmore, Improving risk assessment in financial feasibility of international engineering projects: a risk driver perspective. *Int. J. Proj. Manag.*, 2017, 35 (2).

8. Liua J., Lia H., Skitmoreb M., Zhanga Y., Experience mining based on case-based reasoning for dispute settlement of international construction projects. *Automation in Construction*, January 2019, Vol. 97,

9. Solovieva A.P., Kharitonov V.V., Shmakov O.G. Vliyanie zaderzhek v stroitel'stve AES na effektivnost' investitsii [Impact of delays in the construction of nuclear power plants on the efficiency of investments]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika = Izvestiya VUZov.- Nuclear Energy*, 2018, no. 3, p. 52-62 S05.pmd (nuclear-power-engineering.ru).

10. Muhammad Mufazsal Hossen, Sanku Kang, Chonghyun Kim. Otsenka riska otstavaniya ot grafika stroitel'stva s ispol'zovaniem kombinirovannoi metodiki AHP-RII v

mezhdunarodnykh proektakh po stroitel'stvu atomnykh elektrostantsii (AES) [Assessment of the risk of lagging behind the construction schedule using the combined AHP-RII methodology in international projects for the construction of nuclear power plants (NPP)]. *NuclEngTechnol*, 2015, 47, pp. 362-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2014.12.019>.

11. [International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Energy Series No. NP-T-2.7]. *Upravlenie proektami v stroitel'stve AES: rukovodyashchie printsipy i opyt* [Project Management in Nuclear Power Plant Construction: Guidelines and Experience]. Vienna, 2012. (In Russ.).

12. *KPMG International. Risk nezaversheniya stroitel'stva v novykh proektakh po stroitel'stvu AES (Construction Risk in New Nuclear Power Projects)* [KPMG International. Construction Risk in New Nuclear Power Projects]. Eyes Wide Open, 2011. Available at: kpmg.com/infrastructure.

13. Harris J., Heptonstall P., Gross R., Handley D. Smety dlya sektora atomnoi energetiki Velikobritanii [Costes timates for nuclear power in the UK]. *Energy Policy*, 2013, no. 62, pp. 431-442.

14. Grabovoi P.G., Berezka V.V. Modelirovanie upravleniya riskami predynvestitsionnoi fazy sooruzheniya ob"ektov atomnoi energii na mezhdunarodnom rynke stroitel'stva AES [Modeling the risk management of the pre-investment phase of the construction of atomic energy facilities on the international NPP construction market]. *Nedvizhimost': ekonomika i upravlenie = Real Estate: Economics and Management*, 2021, no. 1, pp. 6-16.

15. Grabovoi P.G., Berezka V.V. Upravlenie organizatsionno-tekhnologicheskimi (operatsionnymi) riskami rossiiskikh podryadchikov pri sooruzhenii AES za rubezhom [Management of organizational and technological (operational) risks of Russian contractors in the construction of nuclear power plants abroad]. *Nedvizhimost': ekonomika i upravlenie = Real Estate: Economics and Management*, 2019, no. 3, pp. 6-17.

16. Chernyakhovskaya Y.V., Berezka V.V. Russian business strategy and tactics on the world market of NPP construction (economic system). *Proceedings of the International Scientific Conference "Far East Con"*. Atlantis Press, 2020, vol. 128.

17. Grabovy P., Berezka V. Determining the Reasonable Degree of Specialization of Russian Companies Participating in NPP Construction Abroad. *Proceedings of XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: "FORM-2020"*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 869.

18. Berezka V.V., Birch V.V., Roehrl A. Osobennosti upravleniya proektami i riskami podryadchika pri osushchestvlenii stroitel'stva v zarubezhnykh stranakh [Features of project management and contractor risks in the implementation of construction in foreign countries]. *Nedvizhimost': ekonomika i upravlenie = Real Estate: Economics and Management*, 2019, no. 1, pp. 13-18.

19. Baronin S.A., Yankov A.G., Bizhanov S.A. Assessing the cost of real estate lifecycle contracts in Russia's present-day economy and the characteristics of the European experience. *Life Science Journal*, 2014, 11(8s), pp. 249-253.

20. Kulakov K.Y., Baronin S.A. Modeling total cost of ownership residential real estate in the life cycles of buildings. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, October 2018, vol. 9, is. 10, , pp. 1140-1148.

21. Chernyakhovskaya Yu.V., Birch V.V. Rossiiskaya strategiya prodazh investitsionno-stroitel'nykh proektov sooruzheniya AES (ekonomicheskikh sistem) na mezhdunarodnom rynke [Russian sales strategy for investment and construction projects for the construction of nuclear power plants (economic systems) on the international market]. *Nedvizhimost': ekonomika i upravlenie = Real Estate: Economics and Management*, 2019, no. 2, pp. 53-60.

Информация об авторах / Information about the Authors

Березка Виталий Викторович, старший преподаватель, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: v.berezka@hotmail.com

Vitaliy V. Berezka, Senior Lecturer, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
e-mail: v.berezka@hotmail.com

Баронин Сергей Александрович, доктор экономических наук, профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: baron60@inbox.ru, Author ID: 269365, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7705-1699>, Researcher ID: AAC-7832-2019 Scopus Author ID: 56184105400

Sergey A. Baronin, Dr. of Sci. (Economic), Professor, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation, e-mail: baron60@inbox.ru, Author ID: 269365, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7705-1699>, Researcher ID: AAC-7832-2019 Scopus Author ID: 56184105400

Бредихин Владимир Викторович, доктор экономических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г.Курск, Российская Федерация, e-mail: bvv001@mail.ru

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University Kursk, Russian Federation, e-mail: bvv001@mail.ru

Зобнев Антон Викторович, аспирант, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: vermilionqtz@mail.ru

Anton V. Zobnev, Post-Graduate Student, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation, e-mail: vermilionqtz@mail.ru

Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей

Н. А. Милостная¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: nat_mil@mail.ru

Резюме

Цель исследования: исследование гипотезы о возможности изменения вида переходного процесса во время обучения нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе соотношения площадей, и изучения свойств влияния весового коэффициента на её устойчивость.

Методы. Для разработки нейро-нечёткой системы вывода в статье используется аппарат нечёткой логики. При этом входные и выходные переменные описываются треугольными функциями принадлежности, в композиционном правиле использовалась модель импликации Мамдани. При дефаззификации применялась линейная модель отношения площадей. Во время обучения использовался метод обратного распространения ошибки.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что предложенная нейро-нечёткая модель, основанная на методе отношения площадей, позволяет изменять вид переходного процесса, а именно преобразовать колебательный процесс в апериодический (монотонный) процесс. Также в ходе экспериментальных исследований было установлено, что на устойчивость нейро-нечёткой системы вывода в большей степени влияет весовой коэффициент, определяемый при расчете общей площади выходных функций принадлежности. Таким образом, полученные результаты доказывают: во-первых, что предложенная нейро-нечёткая система вывода обеспечивает трансформацию передаточных характеристик, а во-вторых, обеспечивает её устойчивость в заданном диапазоне характеристик весового коэффициента.

Заключение. В статье представлена архитектура адаптивной нейро-нечёткой системы вывода, основанной на линейном методе отношения площадей. Отличительной особенностью предлагаемой архитектуры является использование на входах и выходе нечёткой системы треугольных функций принадлежности. Анализ имитационного процесса её обучения показал, что при обучении с целью обеспечения устойчивости необходимо устанавливать допустимые значения весового коэффициента, численные значения которого, в свою очередь, влияют на трансформацию передаточных характеристик нейро-нечёткой системы вывода.

Ключевые слова: адаптивная нейро-нечёткая система вывода; метод отношения площадей; обучение; устойчивость.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ГЗ № 0851-2020-0032.

Для цитирования: Милостная Н. А. Исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 70-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.

Поступила в редакцию 26.08.2021

Подписана в печать 14.09.2021

Опубликована 21.10.2021

Stability Study of a Neuro-Fuzzy Output System Based on Ratio Area Method

Natalya A. Milostnaya¹ ✉

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research is to study the hypothesis about the possibility of changing the type of transition process during training in a neuro-fuzzy inference system based on area ratio method, and to study the properties of weight coefficient influence on its stability.

Methods. An apparatus of fuzzy logic is used for the development of a neuro-fuzzy output system. At the same time, input and output variables are described by triangular membership functions. Mamdani implication model was used in the compositional rule. A linear model of area ratio was used in defasification. The reverse error propagation method was used during training.

Results. In experimental studies, it was found that the proposed neuro-fuzzy model based on area ratio method allows to change the type of transition process, namely, to transform oscillatory process into an aperiodic (monotonic) process. In experimental studies, it was also found that the stability of neuro-fuzzy output system is more influenced by the weight coefficient determined in calculating the total area of membership output functions. Thus, the obtained results prove: first, that the proposed neuro-odd output system ensures the transformation of transfer characteristics, and second, ensures its stability in a given range of weight coefficient characteristics.

Conclusion: The architecture of an adaptive neuro-fuzzy output system based on a linear method of area ratio is described. A distinctive feature of the proposed architecture is the use of an odd system of triangular accessory functions at inputs and outputs. Analysis of the simulation process of its training showed that it is important to ensure stability during training. It is also necessary to establish permissible values of the weight coefficient, numerical values of which in its turn affect the transformation of transfer characteristics of a neuro-fuzzy output system.

Keywords: adaptive neuro-fuzzy output system; area ratio method; training; sustainability.

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

Funding: Work carried out within the framework of the state law № 0851-2020-0032.

For citation: Milostnaya N. A. Stability Study of a Neuro-Fuzzy Output System Based on Ratio Area Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 70-85 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-70-85>.

Received 26.08.2021

Accepted 14.09.2021

Published 21.10.2021

Введение

Модели рассуждений, основанные на нечётком выводе, являются эффективным инструментом для создания систем с искусственным интеллектом. Подобные системы часто используются в задачах распознавания образов [1], высокоскоростной обработки деталей [2], прогнозирования различных ситуаций [3, 4] и моделирования сложных систем управления [5]. Для улучшения численных характеристик интеллектуальных систем используются гибридные модели, например ANFIS-NARX. Эта модель включает адаптивную нейро-нечёткую систему вывода (ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system) и нелинейную авторегрессивную модель с экзогенным входом (NARX – nonlinear autoregressive with exogenous input). В статье [6] авторы показали, что точность оценки предложенного метода ANFIS-NARX намного лучше, чем динамический метод NARX, основанный на искусственной нейронной сети.

В другой гибридной сети (ANN-FL) алгоритм Такаги-Сугено используется для разработки адаптивных нейро-нечётких систем логического вывода, который представляет собой сочетание двух технологий: искусственных нейронных сетей (ANN) и нечёткой логики (FL) [7]. В данной модели – нечёткий вывод используется для получения выходной переменной, при этом если она не совпадает с требуемым значением,

то искусственная нейронная сеть обучает её веса ANFIS [8].

Как правило, точность моделей ANFIS оценивается с помощью коэффициента корня из среднеквадратической ошибки (RMSE – root mean square error). Например, в статье [8] оценивалось моделирование и обучение процесса одновременной адсорбции красителя и иона металла с помощью ANN и ANFIS. Все имитационные эксперименты доказывают, что точность ANFIS выше, чем ANN в 2 и более раза. Алгоритмы обучения ANFIS подразделяются на популяционные алгоритмы (PBA – population-based algorithms) и производные (DBC – derivative-based calculations). Основанные на PBA алгоритмы обучения ANFIS используют гибридные технологии, такие как генетические алгоритмы (GA – genetic algorithms) [9], алгоритмы оптимизации роя частиц (PSO – particle swarm optimization algorithms), алгоритмы искусственных пчелиных семей (ABS – artificial bee colony algorithms) и алгоритмы имитации отжига (SA – simulated annealing algorithms) [10, 11, 12, 13]. Экспериментальные результаты, представленные в этих статьях, показывают, что точность ANFIS в 2 раза выше, чем у алгоритмов GA и в 2 раза ниже, чем у алгоритмов PSO. Алгоритмы GA, PSO и ABS являются популяционными алгоритмами. Общим недостатком этих алгоритмов является

длительное вычислительное время для поиска оптимального решения. Производные алгоритмы DBC с использованием моделей наименьших квадратов (LS – Least Squares) и градиентного спуска (GD – Gradient Descent) рассмотрены в работах [14, 15]. Для их обучения используются следующие машины вывода: машины опорных векторов наименьших квадратов (LS-SVM – least squares support vector machines) и машину, основанную на многоядерных алгоритмах регрессии опорных векторов наименьших квадратов (TS-LSSVR – Takagi–Sugeno system based on multi-kernel least squares support vector regression). В научных исследованиях было установлено, что алгоритм TS-LSSVR имеет лучшие характеристики по сравнению с моделями ANFIS и LS-SVM примерно в 3 раза. Существующие и модифицированные модели ANFIS имеют ряд недостатков, в том числе «проклятие измерения» [16], которое приводит к увеличению времени обучения нейро-нечёткой сети и снижения её точности. Проклятие размерности увеличивает число выводов нечёткого вывода в геометрической прогрессии с увеличением количества входных переменных или их функций принадлежности. Следовательно, время принятия решения в ANFIS увеличивается. Эту ошибку можно исправить, комбинируя нечёткие импликации в композиционном слое ANFIS [17÷19]. Следует отметить, что точность нейро-нечётких си-

стем вывода зависит от модели дефаззификации, используемой в ANFIS. В статье [20] представлен подробный анализ традиционных и нетрадиционных моделей дефаззификации.

Таким образом основная цель ANFIS – оптимизировать параметры системы нечёткого вывода, используя один из алгоритмов обучения. Минимальное значение ошибки между целевым выходным значением и фактическим выходным значением является параметром оптимизации, оцененным, например, с использованием значения RMSE.

Материалы и методы

Математическая модель нейро-нечёткой системы вывода реализуется с помощью следующих математических операций.

Шаг 1. Фаззификация входных переменных. На этом этапе формируются входные и выходные функции принадлежности (ФП). Пусть вход нейро-нечёткой системы вывода имеет две входные переменные и одну выходную. Тогда для её построения рассмотрим следующую MISO-модель:

$$X_1 = \{x_{11}\} + \{x_{12}\} + \{x_{13}\}, \quad (1)$$

$$X_2 = \{x_{21}\} + \{x_{22}\} + \{x_{23}\}, \quad (2)$$

$$Y = \{y_1\} + \{y_2\} + \{y_3\} + \{y_4\} + \{y_5\}, \quad (3)$$

где X_1 , X_2 – входы нечёткой системы; Y – выход нечёткой системы.

Входные и выходные нечёткие переменные для нейро-нечёткой системы вывода представлены на рис. 1.

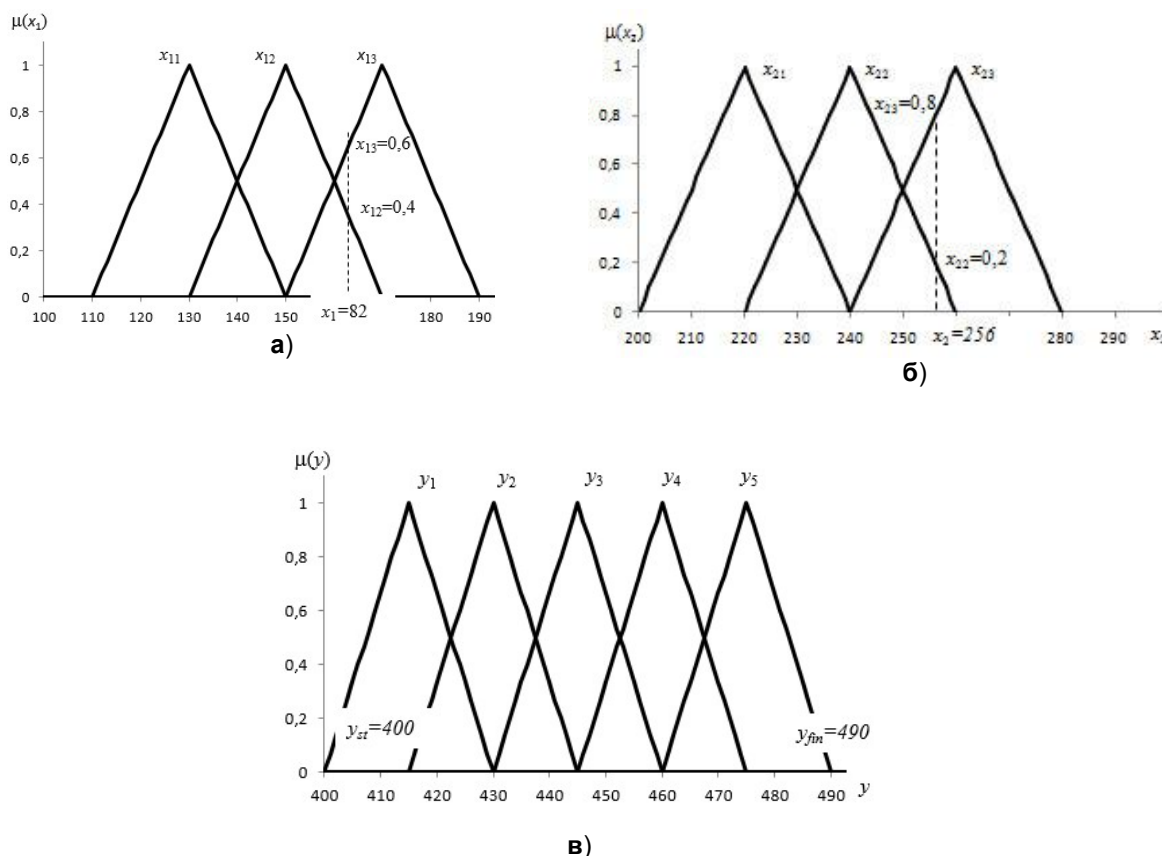


Рис.1. Функции принадлежности: **а** – первая ФП; **б** – вторая ФП; **в** – выходная ФП

Fig. 1. Membership function: **a** – first MF; **b** – second MF; **v** – output MF

В случае использования колоколообразных (Гауссовских) функций принадлежности, время вычисления площадей усеченных ФП в методе отношения площадей увеличивается, поэтому в

статье используются треугольные ФП, что в значительной степени позволяет сократить время их обучения.

Шаг 2. Расчёт степени активации функций принадлежности по формуле

$$\mu_{x_i}(x_{ij}) = \text{trimf}(x_{ij}; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq a; \\ \frac{x_{ij} - a}{b - a}, & a \leq x_{ij} \leq b; \\ \frac{c - x_{ij}}{c - b}, & b \leq x_{ij} \leq c; \\ 0, & c \leq x_{ij}, \end{cases} \quad (4)$$

где a , b , c , d – лингвистические метки треугольных ФП; x_{ij} – четкое значение ядра нечёткого множества.

Шаг 3. Синтез нечётких правил (НП). Чтобы сформировать базу правил, которая определяет исходное соотно-

шение между входными и выходными переменными системы нечёткого вывода, необходимо создать базу нечётких правил вида «Если... То ...»:

FR_p : Если x_1 есть $\mu_{x1}(x_{ij})$ Θ_t x_2 есть $\mu_{x2}(x_{ij})$ Θ_t ...

$$\Theta_t x_i \text{ есть } \mu_{X_n}(x_{nm}) \quad (5)$$

Then y is y_k ,

где Θ_t – знак, обозначающий операцию t-норм (табл. 1); p – количество нечётких правил.

Шаг 4. Расчет степеней активации предпосылок нечётких правил по формуле:

$$\alpha_p = \mu_{X_1}(x_{ij}) \Theta_t \mu_{X_2}(x_{ij}) \Theta_t \dots \Theta_t \mu_{X_n}(x_{nm}). \quad (6)$$

Если несколько нечётких правил ссылаются на один и тот же выходной термин, то нечеткое правило активиру-

ется, и оно имеет максимальную степень вывода нечётких правил, используя формулу:

$$h_k = \alpha_1 \Theta_s \alpha_2 \Theta_s \dots \Theta_s \alpha_p, \quad (7)$$

где Θ_s – знак, обозначающий операцию s-норм (см. табл. 1).

Шаг 5. Формирование базы нечётких правил. Пусть MISO-система нейро-нечёткого контроллера имеет девять нечётких правил, которые сведены в табл. 2.

Таблица 1. Формулы t и s-норм

Table 1. Equations t and s-norm

t-норма (Θ_t) / t-norm (Θ_t)		s-норма (Θ_s) / s-norm (Θ_s)	
Мамдани I_M	$\min(x_{1j}; x_{2j});$ $if \quad I = I_M$	Мамдани I_M	$\max_1^p(\alpha_p); if \quad I = I_M$
Произведение I_{PROD}	$x_{1j} \times x_{2j};$ $if \quad I = I_{PROD}$	Произведение I_{PROD}	$\prod_1^p \alpha_p; if \quad I = I_{PROD}$
Лукашевича I_L	$\min(1, 1 - x_{1j} + x_{2j});$ $if \quad I = I_L$	Алгебраическая сумма I_{AS}	$\alpha_p + \alpha_{p+1} - \alpha_p \times \alpha_{p+1};$ $if \quad I = I_{AS}$
Разности границ I_{BD}	$\max(0, x_{1j} + x_{2j} - 1);$ $if \quad I = I_{BD}$	Суммы границ I_L	$\min(1, \alpha_p + \alpha_{p+1});$ $if \quad I = I_{BS}$
Мягкая I_{SOFT}	$\frac{x_{1j} + x_{2j} + \delta^2 - \sqrt{[x_{1j} - x_{2j}]^2 + \delta^2}}{2},$ $\delta = 0.05 \text{ if } I = I_{SOFT}$	Мягкая I_{SOFT}	$\frac{\alpha_p + \alpha_{p+1} + \delta^2 + \sqrt{[\alpha_p - \alpha_{p+1}]^2 + \delta^2}}{2},$ $\delta = 0.05 \text{ if } I = I_{SOFT}$

Таблица 2. База нечётких правил

Table 2. Base of fuzzy rules

НП	ЕСЛИ		ТО	НП	ЕСЛИ		ТО	НП	ЕСЛИ		ТО
НП ₁	x_{11}	x_{21}	y_5	НП ₄	x_{12}	x_{21}	y_4	НП ₇	x_{13}	x_{21}	y_3
НП ₂	x_{11}	x_{22}	y_4	НП ₅	x_{12}	x_{22}	y_3	НП ₈	x_{13}	x_{22}	y_2
НП ₃	x_{11}	x_{23}	y_3	НП ₆	x_{12}	x_{23}	y_2	НП ₉	x_{13}	x_{23}	y_1

Шаг 6. Дефаззификация методом отношения площадей [20]. На этом шаге необходимо определить общую площадь формы выходной переменной:

$$S_1 = k \cdot w \cdot \frac{d_1}{2}, \quad (8)$$

где k – количество термов выходной ФП ($k = 5$); w – весовой коэффициент; d_1 – ширина основания треугольной функции принадлежности.

Шаг 7. Вычисление площади преобразованных функций принадлежности, которые зависят от значений высоты предпосылок нечётких правил:

$$S_{li} = \begin{cases} S_{li} = 0, & \text{if } h = 0; \\ S_{li} = \frac{d_1}{2}, & \text{if } h = 1; \\ S_{li} = \frac{h}{2}(d_1 + d_3), & \text{if } h \in (0, 1). \end{cases} \quad (9)$$

Шаг 8. Определение общей площади фигуры с преобразованными функциями принадлежности следующим образом:

$$S_2 = \sum_{i=1}^k S_{li}. \quad (10)$$

Шаг 9. Расчет отношения общей площади выходной переменной (см. Уравнение (8)) и общей площади с преобразованными функциями принадлежности (см. уравнение (10)) следующим образом:

$$D = \frac{S_2}{S_1}. \quad (11)$$

Переменная D всегда находится в диапазоне значений от 0 до 1. Чтобы

получить чёткое значение на выходе нечёткой системы, необходимо масштабировать значение переменной D в ядро выходной нечёткой переменной.

Шаг 10. Рассчитать чёткое значение на выходе нечёткой системы с линейной функцией следующим образом:

$$y_{defuz} = [D \cdot (y_{fin} - y_{st})] + y_{st} = \left[\frac{S_2}{S_1} \cdot (y_{fin} - y_{st}) \right] + y_{st}, \quad (12)$$

где y_{st} , y_{fin} – начальное и конечное значения ядра нечёткой ФП (см. рис.1в).

Шаг 11. Обучение нейро-нечёткой системы вывода. На этом этапе предлагаемая модель обучается с использованием метода ошибки обратного распространения по формуле

$$w_{output} = w_{output} + \sigma(y_{defuz} - y_{exp}), \quad \text{до } |y_{defuz} - y_{exp}| \leq T, \quad (13)$$

где w_{output} – весовой коэффициент; σ – скорость обучения нейро-нечёткого контроллера (по умолчанию равен 0,07); T – порог (по умолчанию равен 0,01).

Структурная схема нейро-нечёткой системы вывода показана на рис. 2.

Структурная схема нейро-нечёткой системы вывода, основанная на линейном методе отношения площадей и представленная на рис. 2, работает следующим образом. В блоке «Input» формируется входной сигнал для нечётких сигналов, описанных уравнениями (1)÷(3). В блоках «Degrees X1» и «Degrees X2» по формуле (4) осуществляется расчет степеней активации входных функций принадлежности.

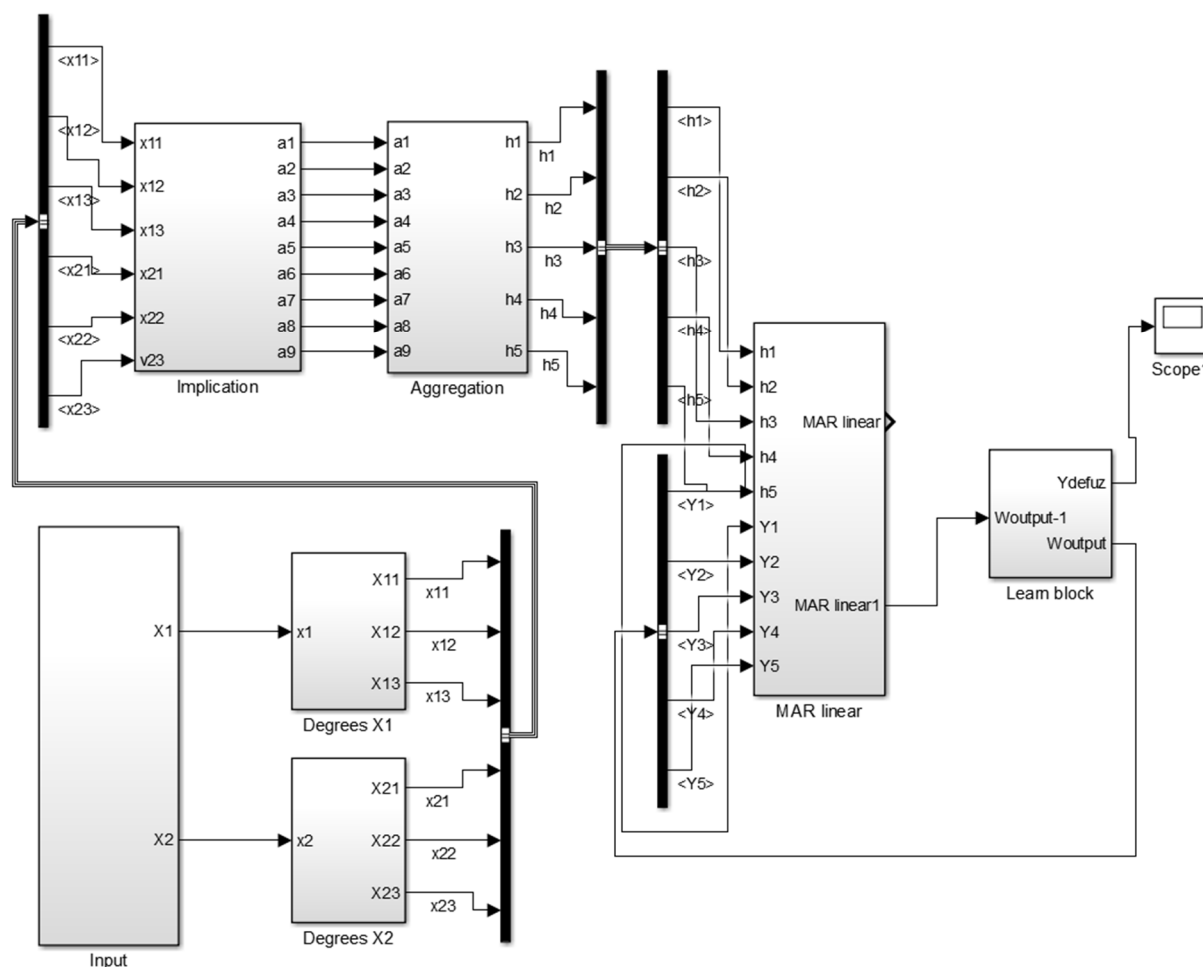


Рис. 2. Структурная схема нейро-нечёткой системы вывода

Fig. 2. Structural schime of neuro-fuzzy inference system

В блоке «Implication» по формуле (6) с помощью одной из t-норм (см. табл. 1) осуществляется расчёт степеней заключений нечёткого вывода. В случае, если несколько заключений ссылаются на одно и то же выходное нечёткое правило (см. табл. 2, например, НП₂ и НП₄), то в блоке «Aggregation» по формуле (7) с использованием одной из s-норм (см. табл. 1) осуществляется выбор наибольшего значения. В блоке «MAR linear» осуществляется по формулам (8)÷(12) дефазификация результирующей переменной на основе метода отношения площадей. В блоке

«Learn block» по уравнению (13) осуществляется обучение нейро-нечёткой системы вывода.

В следующем разделе рассмотрим исследование свойств устойчивости нейро-нечёткой системы вывода.

Результаты и их обсуждение

Во время экспериментальных исследований проводилось моделирование и исследование устойчивости нейро-нечёткой системы вывода, представленной на рис. 2 [21-25].

Следует отметить, что в большинстве нечётких систем для обеспечения ус-

тойчивости используется следующий метод. Управляющий регулятор наблюдает состояние входного объекта. Если состояние выходит за некоторые установленные границы, то управляющий регулятор запускает режим стабилизации, чтобы вернуть входной объект в область заданных условий его функционирования. Если сигнал стабилизации не позволяет перевести управляемый объект в область допустимых значений, то осуществляется отключение системы. На-

пример, структуры системы, представленной на рис. 2, при стабилизации входного сигнала, например, к значению 460 из ядра выходной нечёткой переменной (см. рис. 1в), при весовом коэффициенте $w = 0,07$ (см. фор. (8)) наблюдается неустойчивое состояние системы, которое представлено на рис. 3. Видно, что нейро-нечёткая система вывода не может обучить систему, находится в диапазоне значений [478; 442] и не может перейти к заданному значению 460.

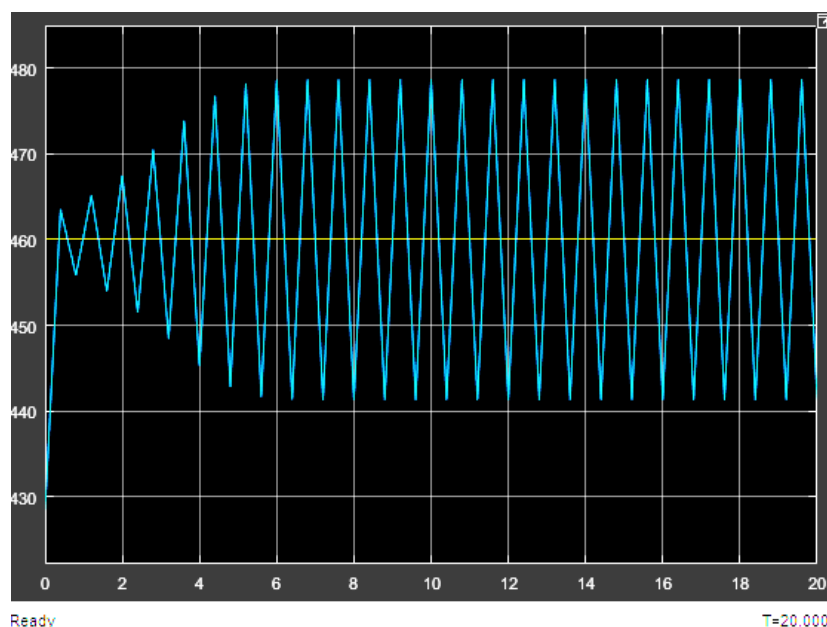


Рис. 3. Неустойчивое состояние нейро-нечёткой системы вывода

Fig. 3. Unstable condition of neuro-fuzzy inference system

На представленном рис. 3 под устойчивостью понимается состояние нейро-нечёткой системы вывода, если она обучает модель и состояние системы не выходит за заданные границы, установленные лицом, принимающим решение.

Таким образом, рассматриваемая нейро-нечёткая система вывода, используя круговой критерий устойчивости,

является глобально и асимптотически устойчивой, если круг с центром на вещественной оси в целевой точке

$$O = -0.5 \times \left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right)$$

и радиусом

$$r = 0.5 \times \left(\frac{1}{\kappa_1} - \frac{1}{\kappa_2} \right)$$

размещается целиком в области, прилегающей к левой части частотной характеристики линейной части системы, и не соприкасается с ней (рис. 4). При этом $k_1 \geq 0$ и $k_2 \geq 0$.

Рассмотрим передаточные характеристики процесса обучения нейро-не-

чёткой системы вывода. Так же, как и в предыдущем случае оставим центр обучения равным 460, но исследуем процесс влияния весового коэффициента w (см. фор. (8)) на устойчивость нейро-нечёткой системы вывода для двух центров 460 и 425.

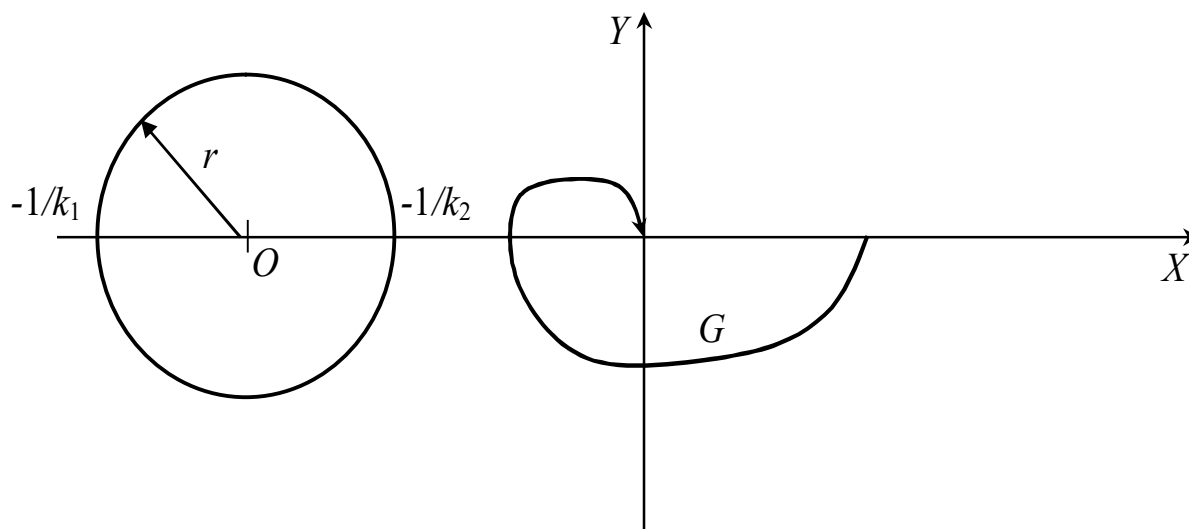


Рис. 4. Круговой критерий устойчивости нейро-нечёткой системы вывода

Fig. 4. Circular criterion for the stability of the neuro-fuzzy inference system

На основании полученных результатов, представленных на рис. 5 и рис. 6, подтверждена гипотеза о том, что нейро-нечёткая система, основанная на методе отношения площадей, позволяет изменять вид переходного процесса, то есть трансформировать его из колебательного в апериодический (монотонный) процесс. В первом случае ($O=460$), на рис. 5в и 5г видно, что при значении весового коэффициента, равном $w=0,03$, осуществляется преобразование из одного вида переходной характеристики в другой. Во втором случае ($O=425$), на

рис. 6б и 6в видно, что при значении весового коэффициента, равном $w=0.1$, осуществляется преобразование из одного вида переходной характеристики в другой.

Также в ходе имитационного моделирования было установлено, что на устойчивость нейро-нечёткой системы вывода влияет диапазон числовых величин весового коэффициента, и были установлены допустимые границы весового коэффициента, необходимые для обеспечения устойчивости нейро-нечёткой системы вывода.

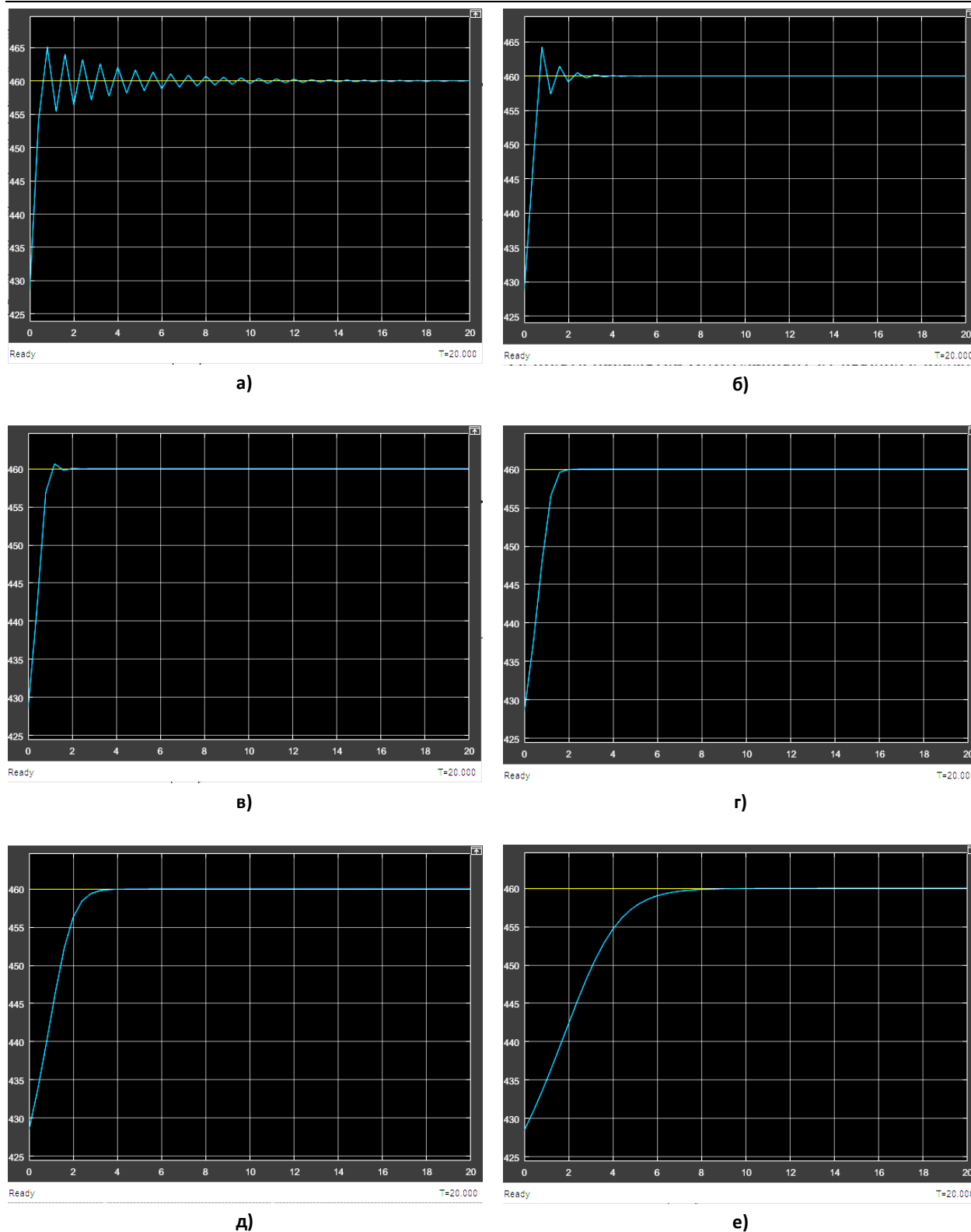


Рис. 5. Переходный процесс в целевой точке 460: **а** – $w = 0.06$; **б** – $w = 0.05$; **в** – $w = 0.04$; **г** – $w = 0.03$; **д** – $w = 0.02$; **е** – $w = 0.01$

Fig. 5. Transient process at the target point 460: **а** – $w = 0.06$; **б** – $w = 0.05$; **в** – $w = 0.04$; **г** – $w = 0.03$; **д** – $w = 0.02$; **е** – $w = 0.01$

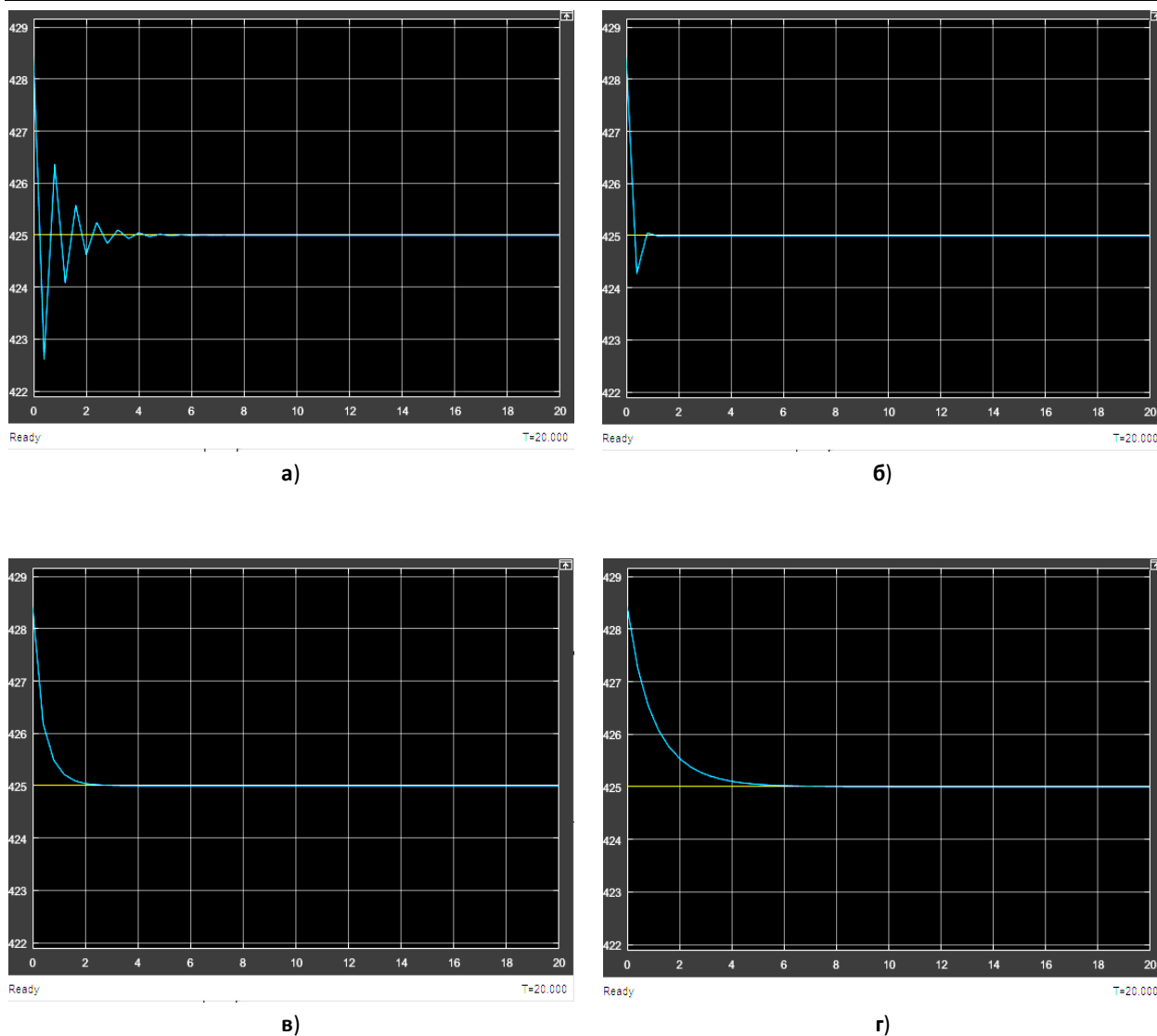


Рис. 6. Переходный процесс в целевой точке 425: **а** – $w = 0.3$; **б** – $w = 0.2$; **в** – $w = 0.1$; **г** – $w = 0.05$

Fig. 6. Transient process at the target point 425: **a** – $w = 0.3$; **б** – $w = 0.2$; **в** – $w = 0.1$; **г** – $w = 0.05$

Выводы

В данной статье представлена структурно-функциональная организация нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей. Проведено имитационное моделирование нейро-нечёткой системы вывода в среде Simulink. В ходе экспери-

ментальных исследований подтверждено, что разработанная нейро-нечёткая система вывода позволяет трансформировать вид переходного процесса из колебательного в апериодический (монотонный) процесс. В статье определены параметры, влияющие на устойчивость нейро-нечёткой системы вывода и даны рекомендации по их подбору.

Список литературы

1. Shahmoradi S., Shouraki S.B. Evaluation of a novel fuzzy sequential pattern recognition tool (fuzzy elastic matching machine) and its applications in speech and handwriting recognition // *Applied Soft Computing*. 2018. N62. P. 315-327.
2. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 5. С. 18-23.
3. Hodgett R.E., Siraj S. SURE: A method for decision-making under uncertainty // *Expert Systems with Applications*. 2019. N 115. P. 684-694.
4. Temur G.T. A novel multi attribute decision making approach for location decision under high uncertainty // *Applied Soft Computing*. 2016. N 40. P. 674-682.
5. Бобырь М.В., Титов В.С., Акульшин Г.Ю. Моделирование нечетко-логических систем управления на основе мягких арифметических операций // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2013. № 3 (105). С. 29-35.
6. Annabestani, M., Naghavi, N. Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm // *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2014. N209. P. 140–148.
7. A. Piegat *Fuzzy Modelling and Control*. Physica-Verlag, Heidelberg. 2001.
8. Modeling of simultaneous adsorption of dye and metal ion by sawdust from aqueous solution using of ANN and ANFIS / M. Dolatabadi, M. Mehrabpour, M. Esfandyari, H. Alidadi, M. Davoudi // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2018. N 181. P. 72-78.
9. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Механизм адаптации нечеткой системы вывода на основе генетического алгоритма // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2015. № 3. С. 27-32.
10. Rezakazemi M., Dashti A., Asghari M., Shirazian S. H₂-selective mixed matrix membranes modeling using ANFIS, PSO-ANFIS, GA-ANFIS // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. N42. P. 15211-15225.
11. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. Overbreak prediction in underground excavations using hybrid ANFIS-PSO model // *Bioresource Technology*. 2018. N267. P. 634-641.
12. Karaboga D., Kaya E. An adaptive and hybrid artificial bee colony algorithm (ABC) for ANFIS training // *Applied Soft Computing*. 2016. N49. P. 423-436.
13. Haznedar B., Kalinli A. Training ANFIS structure using simulated annealing algorithm for dynamic systems identification // *Neurocomputing*. 2018. N 302. P. 66-74.
14. Boulkaibet I., Belarbi K., Bououden S., Chadli M., Marwala T. An adaptive fuzzy predictive control of nonlinear processes based on Multi-Kernel least squares support vector regression // *Applied Soft Computing*. 2018. N 73. P. 572-590.
15. Li L.J., Su H.Y., Chu J., Generalized predictive control with online least squares support vector machines // *Acta Automatica Sinica*. 2007. N 33. P.1182–1188.

16. An ANFIS model of quality of experience prediction in education / T. Vasileva-Stojanovska, M. Vasileva, T. Malinovski, V. Trajkovik // *Applied Soft Computing*. 2015. N 34. P. 129-138.
17. Vemuri N.R. Mutually exchangeable fuzzy implications // *Information Sciences*. 2015. N317. P. 1-24.
18. Laha A. Building contextual classifiers by integrating fuzzy rule based classification technique and k-nn method for credit scoring // *Adv. Eng. Inf.*, 2007. N21. P. 281-291.
19. Casale G., Pérez J.F., Wang W. QD-AMVA: Evaluating systems with queue-dependent service requirements // *Perform. Eval.* 2015. N 91. P. 80-98.
20. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas ratio // *Applied Soft Computing*. 2017. N59. P. 19-32.
21. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015. № 7 (133). С. 7-15.
22. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. T. 88. P. 106030.
23. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the cnc machine implemented on FPGA // *Measurement*. 2020. T. 152. P. 107378.
24. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 5. С. 18-23.
25. Бобырь М.В. Методы построения функций принадлежности для нечетких баз знаний // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2011. № 2. С. 27-32.

References

1. Shahmoradi S., Shouraki S.B. Evaluation of a novel fuzzy sequential pattern recognition tool (fuzzy elastic matching machine) and its applications in speech and handwriting recognition. *Applied Soft Computing*, 2018, no. 62, pp. 315-327.
2. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Adaptivnyi mul'tisetevoi algoritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU [Adaptive multi-network fuzzy inference algorithm in problems of control of equipment with CNC]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2013, no. 5, pp. 18-23.
3. Hodgett R.E., Siraj S. SURE: A method for decision-making under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 2019, no. 115, pp. 684-694.
4. Temur G.T. A novel multi attribute decision making approach for location decision under high uncertainty. *Applied Soft Computing*, 2016, no. 40, pp. 674-682.

5. Bobyr M.V., Titov V.S., Akulshin G.Yu. Modelirovanie nechetko-logicheskikh sistem upravleniya na osnove myagkikh arifmeticheskikh operatsii [Modeling of fuzzy-logical control systems based on soft arithmetic operations]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2013, no. 3 (105), pp. 29-35.

6. Annabestani M., Naghavi N. Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2014, no. 209, pp. 140-148.

7. A. Piegat Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001.

8. Dolatabadi M., Mehrabpour M., Esfandyari M., Alidadi H., Davoudi M. Modeling of simultaneous adsorption of dye and metal ion by sawdust from aqueous solution using of ANN and ANFIS. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2018, no. 181, pp. 72-78.

9. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Mekhanizm adaptatsii nechetkoi sistemy vyvoda na osnove geneticheskogo algoritma [Adaptation mechanism of a fuzzy inference system based on a genetic algorithm]. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2015, no. 3, pp. 27-32.

10. Rezakazemi M., Dashti A., Asghari M., Shirazian S. H₂-selective mixed matrix membranes modeling using ANFIS, PSO-ANFIS, GA-ANFIS. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, no. 42, pp. 15211-15225.

11. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M. Overbreak prediction in underground excavations using hybrid ANFIS-PSO model. *Bioresource Technology*, 2018, no. 267, pp. 634-641.

12. Karaboga D., Kaya E. An adaptive and hybrid artificial bee colony algorithm (ABC) for ANFIS training. *Applied Soft Computing*, 2016, no. 49, pp. 423-436.

13. Haznedar B., Kalinli A. Training ANFIS structure using simulated annealing algorithm for dynamic systems identification. *Neurocomputing*, 2018, no. 302, pp. 66-74.

14. Boulkaibet I., Belarbi K., Bououden S., Chadli M., Marwala T. An adaptive fuzzy predictive control of nonlinear processes based on Multi-Kernel least squares support vector regression. *Applied Soft Computing*, 2018, no. 73, pp. 572-590.

15. Li L.J., Su H.Y., Chu J. Generalized predictive control with online least squares support vector machines. *Acta Automatica Sinica*, 2007, no. 33, pp. 1182-1188.

16. Vasileva-Stojanovska T., Vasileva M., Malinovski T., Trajkovik V. An ANFIS model of quality of experience prediction in education. *Applied Soft Computing*, 2015, no. 34, pp. 129-138.

17. Vemuri N.R. Mutually exchangeable fuzzy implications. *Information Sciences*, 2015, no. 317, pp. 1-24.

18. Laha A. Building contextual classifiers by integrating fuzzy rule based classification technique and k-nn method for credit scoring. *Adv. Eng. Inf.*, 2007, no. 21, pp. 281-291.

19. Casale G., Pérez J.F., Wang W. QD-AMVA: Evaluating systems with queue-dependent service requirements. *Perform. Eval.*, 2015, no.91, pp. 80-98.

20. Bobyr, M.V., Milostnaya, N.A., Kulabuhov, S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas ratio. *Applied Soft Computing*, 2017, no. 59, pp.19-32.
21. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Analiz ispol'zovaniya myagkikh arifmeticheskikh operatsii v strukture nechetko-logicheskogo vyvoda [Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy inference]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = *Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 7 (133), pp. 7-15.
22. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, p. 106030.
23. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the cnc machine implemented on FPGA. *Measurement*, 2020, vol. 152, p. 107378.
24. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Adaptivnyi mul'tisetevoi algo-ritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem S ChPU [Adaptive multi-network fuzzy inference algorithm in control problems for CNC equipment]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*. 2013, no. 5, pp. 18-23.
25. Bobyr M.V. Metody postroeniya funktsii prinadlezhnostoni dlya nechetkikh baz znaniy [Methods for constructing accessory functions for fuzzy knowledge bases]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* = *Industrial ACS and Controllers*, 2011, no. 2, pp. 27-32.

Информация об авторе / Information about the Author

Милостная Наталья Анатольевна,
кандидат технических наук, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: nat_mil@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Natalya A. Milostnaya, Cand. of Sci.
(Engineering), Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: nat_mil@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Чебышёвский альтернанс при аппроксимации начальных условий обратной задачи Коши

А. П. Локтионов¹ 

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

 e-mail: loapa@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Работа посвящена кругу вопросов, относящихся к задаче Коши на отрезке действительной оси с приложением к исследованию обратной задачи Коши, в которой по экспериментальным или табличным значениям решения дифференциального уравнения оптимально восстанавливают вещественные константы – начальные условия. В качестве объекта исследования выбрана информационно-измерительная система, в которой по дискретным значениям функции решения задачи Коши вычисляются приближенные значения начальных условий.

Методы. Для этого решены следующие задачи: разработаны параметры размещения измерительного участка на исследуемом объекте и сетка аппроксимации на измерительном участке. Сформулированы характеристики точности восстановления начальных условий задачи.

Результаты. Предложен экспериментально-расчетный метод определения начальных условий в обратной задаче Коши, основанный на понятии целевой функции регуляризации задачи. Также предложен параметр регуляризации задачи в виде минимального значения функцией Лебега.

Заключение. В результате проведенных исследований рассмотрена реакция метода равномерного приближения начальных условий в обратной задаче Коши на отклонение координат узлов сетки аппроксимации от координат Чебышёвского альтернанса. Приведены графики реакции метода на отклонение шага сетки от оптимального шага.

Ключевые слова: задача Коши; начальные условия; чебышёвский альтернанс; информационно-измерительная система.

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

Для цитирования: Локтионов А. П. Чебышёвский альтернанс при аппроксимации начальных условий обратной задачи Коши // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 86-102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-86-102>.

Поступила в редакцию 09.07.2021

Подписана в печать 14.09.2021

Опубликована 21.10.2021

Chebyshev Alternance when Approximating Initial Conditions of the Inverse Cauchy Problem

Askold P. Loktionov ¹ ✉

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

✉ e-mail: loapa@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The work is devoted to a range of questions related to Cauchy problem on the segment of real axis with the application of the inverse Cauchy problem, in which real constants are initial conditions which are optimally restored according to experimental or tabular values of the solution of the differential equation. The object of the study is an information-measuring system, in which approximate values of initial conditions are calculated from discrete function values of Cauchy problem solving.

Methods. The following problems are solved for this purpose: parameters of measuring section placement on the investigated object and approximation grid on measuring section are developed. Characteristics of recovery accuracy of initial conditions of the task are formulated.

Results. An experimental-calculated method of determining initial conditions in the inverse Cauchy problem is proposed. It is based on the concept of objective function of regularization of the problem. Task regularization parameter in the form of minimum value by Lebesgue function is proposed.

Conclusion. The reaction of uniformly approximating method of the initial conditions of the inverse Cauchy problem to the deviation of the approximation grid coordinates nodes from the coordinates of Chebyshev alternance was described. Graphs of method reaction to deviation of grid pitch from optimal pitch are given.

Keywords: Cauchy problem; initial conditions; Chebyshev's alternance; information and measurement system.

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

For citation: Loktionov A. P. Chebyshev Alternance when Approximating Initial Conditions of the Inverse Cauchy Problem. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 86-102 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-86-102>.

Received 09.07.2021

Accepted 14.09.2021

Published 21.10.2021

Введение

Во многих приложениях математической физики (например, в теоретической механике, гидродинамике, теории упругости) ее модели часто сводятся к краевым задачам для дифференциальных уравнений. Основным инструментом исследования процессов, определя-

емых начальным состоянием и нахождением решения дифференциального уравнения, является задача Коши. Если дано семейство достаточное число раз дифференцируемых функций решения дифференциального уравнения, то можно восстановить начальные условия. Развитие методов вычислительной математики, в частности, численного диф-

ференцирования, позволило приступить к исследованию задачи восстановления начальных условий по экспериментальным (табличным) значениям полиномиальной функции (решения дифференциального уравнения) как обратной задачи Коши [1, 2]. В работе [2] исследована задача с недоступностью измерений на одном конце измеряемого объекта. Обратные задачи, связанные с обработкой экспериментальных данных (результатов наблюдений), могут характеризоваться малым объемом и невысокой точностью [3-7]. В работе [8] обсуждены теоретические и вычислительные вопросы выбора метрологической модели измерений, аттестации алгоритмов обработки данных вычислительным устройством, корректной оценки неопределенности измерений. Для этапа обработки данных формируют модель исходных данных, модель погрешностей, показатели качества алгоритмов обработки данных. При обработке информационно-измерительной системой (ИИС) данных измеренных входных величин в обратных задачах применяют редукцию измерений, полиномиальную аппроксимацию, линейную лагранжеву интерполяцию, методы регуляризации, непараметрические методы [3-5, 9-18]. Простой метод решения некорректной задачи численного дифференцирования – сеточный метод решения на измерительном компакте [7, 15, 19-22]. Обширные результаты получены в исследованиях сеток аппроксимации с постоянным шагом при решении дифферен-

циальных уравнений для аппроксимации граничных условий [7]. Для вычисления производных используют различные алгоритмы, например, алгоритм Ремеза, построение специальной системы нелинейных уравнений [4, 7, 17, 18, 23, 24].

Существует несколько проблем в определении целевых характеристик в обратной задаче Коши. Эти проблемы включают в себя учет погрешности датчиков и оптимизацию распределения датчиков по отрезку задания решения с целью минимизирования влияния погрешности датчиков на результаты расчета целевых характеристик [1, 3, 5, 21, 22, 25, 26]. Сходимость интерполяционных процессов и оценка погрешности интерполяции связана с функциями и константами Лебега [7, 25-28]. Размещение измерительного участка, сопряженного с внешней средой, вызывает рост методической погрешности целевых характеристик [29-31]. В работе [29] решена тестовая задача: стальная консольная балка, длина 10 м, момент инерции $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$, сосредоточенная нагрузка 4 Т. Установлено, что балка с жесткой опорой находится практически в однородном напряженно-деформированном состоянии на участке $[0,1l, l]$. При нагружении балки на свободном конце сосредоточенной нагрузкой $P \leq 0,32EI l^{-2}$ расхождения между вертикальными перемещениями становятся меньше 1% для поперечных сечений, удаленных от заделки более, чем на $0,056l$.

Развиваемый автором численный метод определения начальных условий в обратной задаче Коши по экспериментальным или табличным значениям функции решения дифференциального уравнения основан на ранее полученных результатах исследований численного дифференцирования [1, 2, 4, 7] и частных результатах восстановления начальных параметров через лагранжевы коэффициенты методом неопределенных коэффициентов [15, 20, 23]. Метод неопределенных коэффициентов имеет недостаток – для восстановления каждого из начальных параметров необходимо составлять новый алгоритм и решать новую систему уравнений для получения новых лагранжевых коэффициентов.

Развиваемый автором метод направлен на получение общего набора подлежащих восстановлению начальных параметров с предварительной оптимизацией сетки аппроксимации параметром регуляризации задачи для получения максимальной точности восстановления начальных параметров, что является актуальным и полезным направлением исследования.

Материалы и методы

Модель измерений и обработки данных

Рассмотрим на множестве действительных чисел, отрезке задания решения – компакте $K_1 = [0, l]$, принадлежащем вещественной плоскости $\mathbb{R}^2$, линейное неоднородное дифференциаль-

ное уравнение с одним неизвестным x и решение этого уравнения

$$\frac{d^n v}{dx^n} = f(x), \quad x \in K_1, \quad (1)$$

$$v(x) = \sum_{r=0}^n \frac{d_{n,r}}{r!} x^r, \quad (2)$$

где n – порядок дифференциального уравнения и степень уравнения $v(x); f(x)$ – постоянная $d_{n,n} (f(x) \neq 0)$; $v(x)$ – решение задачи Коши; $d_{n,r} = v^{(r)}(x)|_{x=0} - (r = 0 : n - 1)$.

В продолжение работ [1, 2, 15] рассмотрим класс обратных задач Коши восстановления значений целевых характеристик исследуемого объекта, представляемого дискретными значениями функции $v(x)$. К исследуемым целевым характеристикам относим функцию $f(x)$ и начальные условия, которые в задаче Коши состоят в задании производных функции $v(x)$ при $x = 0$ (данных Коши).

Алгоритм вычисления начальных условий обратной задачи Коши реализуется в ИИС. ИИС состоит из измерительного и вычислительного компонентов. Измерительный компонент включает в себя датчики и канал связи [1].

В системе (измеряемый объект – функция $v(x)$ на компакте K_1 , среда, ИИС) на вход ИИС по числу датчиков поступает N значений функции $v(x)$:

$$v(x_i) = \sum_{r=0}^n \frac{d_{n,r}}{r!} x_i^r, \quad (3)$$

где $i = 1 : N; N = n + 1$.

В значениях $v(x_i)$ учитываем влияющие факторы, в том числе связанные с внешней средой.

С учетом современного уровня развития вычислительной техники рассмотрим обратную задачу Коши с погрешностью датчиков и канала связи $R(v_i)$, значительно превосходящей вычислительную погрешность округления в вычислительном компоненте ИИС. На вход вычислительного компонента ИИС от N датчиков в измерительном компоненте ИИС поступают N измеренных значений $v^*(x_i) = v(x_i) + R(v_i)$ функции $v(x)$.

На выходе ИИС получаем восстановленные значения целевых характеристик исследуемого объекта в системе (исследуемый объект – вещественная плоскость, среда).

Заменим функции $v^*(x)$ и $d_{n,r}$ приближенными функциями $F(x)$ и w_j , соответственно, которые просто вычисляются:

$$\left. \begin{aligned} v^*(x) &\approx F_n(x) = \sum_{r=0}^n \frac{w_{n,r}}{r!} x^r, \\ d_{n,r} &\approx w_{n,r} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Для получения разрешенной системы уравнений воспользуемся условиями Лагранжа в виде:

$$\sum_{r=0}^n \frac{w_{n,r}}{r!} x_i^r = v^*(x_i), \quad (i = 1 : N). \quad (5)$$

Совокупность этих условий при заданных x_i (среди узлов x_i не должно быть совпадающих) образуют систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в покомпонентной форме отно-

сительно неизвестных коэффициентов $w_{n,r}$. В матричной форме система (5) – $Aw = v^*$, где w – столбец неизвестных составим из коэффициентов $w_{n,r}$, v^* – столбец свободных членов составим из табличных (измеренных) i -тых значений функции v^* , а матрицу системы A представим в виде:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2/2 & \dots & x_1^n/n! \\ 1 & x_2 & x_2^2/2 & \dots & x_2^n/n! \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n+1} & x_{n+1}^2/2 & \dots & x_{n+1}^n/n! \end{pmatrix}.$$

Для получения СЛАУ набор числовых значений функций $x_i^r/r!$ в левых частях уравнений (5) используем в матрице A константами. Матрица A подобна матрице Вандермонда, следовательно, она, как и матрица Вандермонда, хотя неособая, но становится плохо обусловленной при увеличении n . Решением СЛАУ получаем значения целевых характеристик $d_{n,r}$ по второму уравнению (4).

Рассмотрим взаимодействие исследуемого объекта на компакте K_1 с внешней средой. Будем считать, что измерения недоступны на левом и правом конце измеряемого объекта – отрезка $[0, l]$. Воспользуемся принципом Сен-Венана в теории упругости для снижения методической погрешности целевых характеристик, вызванной неравномерностью распределения деформаций внешней среды и компакта K_1 в окрестности точек $x=0$ и $x=l$. Тогда на измеряемом объекте $[0, l]$ сетка аппрок-

симации и измерительный участок $[a, b]$ имеют вид:

$$a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_N \leq b, \quad (6)$$

то есть на компакте $K_2 = [a, b]$ при $a = \alpha_1 l$, $b = (1 - \alpha_2)l$.

Для производных $d_{n,r}$ функции $v(x)$ используем одномерное лагранжевое приближение первой степени

$$\left. \begin{aligned} d_{n,r} &\approx F_n^{(r)}(0) = \sum_{i=1}^{n+1} L_{n,r,i}(0) v^*(x_i), \\ r &\in (0, 1, \dots, n) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $L_{n,r,i}(0)$ – лагранжевы коэффициенты.

Лагранжевы коэффициенты в аппроксимационной формуле (7) представим в виде:

$$L_{n,r,i}(0) = L_{n,0,i}^{(r)}(x) \big|_{x=0}, \quad (8)$$

$$\text{где } L_{n,0,i}(x) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} (x - x_j) \bigg/ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} (x_i - x_j),$$

$$\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} (x - x_j) = (x - x_1)(x - x_2) \dots$$

$$\dots (x - x_{j-1})(x - x_{j+1}) \dots (x - x_n)(x - x_{n+1}).$$

Формирование характеристик точности восстановления начальных условий

Рассмотрим при обработке небольшого массива экспериментальных результатов ($N \leq 5$) равномерную непрерывную норму погрешности датчиков и канала связи.

Для оценки уровня погрешности исследуемых целевых характеристик, получаемых решением обратной задачи

Коши, воспользуемся абсолютным числом обусловленности измерительно-вычислительной задачи – величиной $\alpha_{n,r}(0)$, устанавливающей связь между верхними границами абсолютной погрешности датчиков и канала связи $\Delta_{\max}[v(x_i)]$ и решения $\Delta_{\max}[d_{n,r}]$ неравенством

$$\Delta_{\max}[d_{n,r}] \leq \alpha_{n,r}(0) \sup \Delta_{\max}[v(x_i)]. \quad (9)$$

Абсолютное число обусловленности задачи $\alpha_{n,r}(0)$ представим целевой функцией Лебега в виде:

$$\lambda_{n,r}(0) = \alpha_{n,r}(0) = \sum_{i=1}^{n+1} |L_{n,r,i}(0)|, \quad (10)$$

$$r \in (0, 1, \dots, n)$$

Целевая функция Лебега позволяет оценить влияние погрешности датчиков, положения компакта K_2 и распределения датчиков в компакте K_2 на точность экстраполирования исследуемых целевых характеристик.

Параметр регуляризации обратной задачи Коши представим в виде аппроксимационной константы:

$$\begin{aligned} \lambda_{n,r} &= \min \lambda_{n,r}(0) = \\ &= \min \left\{ \frac{\Delta_{\max}[d_{n,r}]}{\Delta_{\max}[v(x_i)]} \right\}, \quad (11) \\ r &\in (0, 1, \dots, n) \end{aligned}$$

Для определения координат $n+1$ узлов сетки аппроксимации (6) при $n \geq 1$ по аппроксимационной константе воспользуемся координатами Чебышёвских экстремумов в виде:

$$x_i = \frac{a+b}{2} - \frac{b-a}{2} \cos\left(\pi \frac{i-1}{n}\right), \quad (12)$$

$$(i = 1:n+1)$$

Исходя из текущего состояния обработки экспериментальных данных можно сформулировать область применения и основные положения разработанного метода определения начальных условий обратной задачи Коши (далее по тексту «Метод»).

Результаты и их обсуждение

Метод предусматривает размещение измерительного участка на удалении от точки $x=0$ на расстояние, на котором неравномерность распределения деформаций вещественной плоскости $\mathbb{R}^2$ уменьшается настолько, что погрешность Метода, вызванная этой неравномерностью, становится сопоставимой с погрешностью, вызванной датчиками.

При минимизировании погрешности Метода, когда погрешность датчиков значительно превосходит вычислительную погрешность округления, для узлов сетки аппроксимации использованы координаты Чебышёвских экстремумов.

В частности, для $n = 3$ координаты Чебышёвских экстремумов имеют вид

$$\left. \begin{aligned} x_1 = a, \quad x_2 = \frac{3a+b}{4}, \\ x_3 = \frac{a+3b}{4}, \quad x_4 = b \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Используем соотношения $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,05$ по результатам исследования [29], при

которых координаты (15) узлов сетки аппроксимации имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1 = 0,0500l, \quad x_2 = 0,275l, \\ x_3 = 0,725l, \quad x_4 = 0,950l \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Для $n = 4$ координаты Чебышёвских экстремумов представим в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_1 = a, \quad x_2 = \frac{a+b}{2} - \frac{b-a}{4} \sqrt{2}, \\ x_3 = \frac{a+b}{2}, \\ x_4 = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{4} \sqrt{2}, \quad x_5 = b \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

при $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,05$:

$$\left. \begin{aligned} x_1 = 0,0500l, \quad x_2 = 0,182l, \\ x_3 = 0,500l, \quad x_4 = 0,818l, \\ x_5 = 0,950l \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Анализируются вычислительные программы, реализующие алгоритмы предложенного Метода.

Данный Метод описывает вычисление правой части уравнения (1) и начальных условий обратной задачи Коши с использованием координат (15) Чебышёвских экстремумов для определения узлов сетки аппроксимации (6) для последующего решения СЛАУ по условиям Лагранжа (5) или для вычисления лагранжевых коэффициентов (8) с подстановкой их в правую часть уравнения (7). В частности, начальные условия $d_{4,2}$ и $d_{4,3}$ по (7) и аппроксимационные константы $\lambda_{4,2}$ и $\lambda_{4,3}$ по (11) представимы в виде:

$$\left. \begin{aligned} d_{4,2} &= 4\Gamma_1/(b-a)^4, \quad d_{4,3} = 48\Gamma_2/(b-a)^4, \\ \Gamma_1 &= [6(a+b)(a+3b)-(b-a)^2]y_1 - 2[10(a+b)^2 + 8ab + 3(b^2 - a^2)\sqrt{2}]y_2 + \\ &+ 2[10(a+b)^2 + 8ab - (b-a)^2]y_3 - 2[10(a+b)^2 + 8ab - 3(b^2 - a^2)\sqrt{2}]y_4 + \\ &+ [6(a+b)(3a+b)-(b-a)^2]y_5, \\ \Gamma_2 &= -(3a+5b)y_1 + [8(a+b) + (b-a)\sqrt{2}]y_2 - \\ &- 8(a+b)y_3 + [8(a+b) - (b-a)\sqrt{2}]y_4 - (5a+3b)y_5, \\ \lambda_{4,2} &= 64[5(a+b)^2 + 4ab]/(b-a)^4, \quad \lambda_{4,3} = 1536(a+b)/(b-a)^4 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

при $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,05$:

$$\left. \begin{aligned} d_{4,2} &= (101,14y_1 - 173,12y_2 + 116,69y_3 - 80,008y_4 + 35,299y_5)/l^2, \\ d_{4,3} &= (-358,48y_1 + 678,39y_2 - 585,28y_3 + 492,16y_4 - 226,79y_5)/l^3, \\ \lambda_{4,2} &= 506/l^2, \quad \lambda_{4,3} = 2341/l^3 \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Результаты сравнительного анализа Метода с известными моделями показывают, что расчет аппроксимационных констант по известным моделям решения дифференциальных уравнений на сетке аппроксимации с постоянным шагом по [7] для аппроксимации граничных (начальных) условий $d_{4,2}$ и $d_{4,3}$ с введением условий $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,05$ к сетке (6) имеют вид:

$$\lambda_{4,2} = 675/l^2, \quad \lambda_{4,3} = 3121/l^3. \quad (19)$$

Результат сравнения аппроксимационных констант в (18) и (19) при одинаковой погрешности датчиков – погрешность аппроксимации известных моделей превышает результат по предложенному Методу на 33 %. Предложенный Метод лучше существующих, не имеющих к сетке (6) условий вида

$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,05$ – в Метод с учетом результатов работы [29] в измерениях не используются окрестности точек $x=0$ и $x=l$, где уровень методической погрешности резко возрастает в сравнении с погрешностью датчиков. Указанные преимущества Метода проявляются в технических приложениях вычислительной математики, в частности, для повышения точности методик [6, 32-34] обследования строительных объектов.

Далее рассмотрена реакция Метода на отклонение координат узлов сетки аппроксимации от координат Чебышёвских экстремумов (12). На рис. 1-3 приведены графики реакции Метода на это воздействие в виде безразмерных абсолютных чисел обусловленности задачи $A_{n,r} = l''\alpha_{n,r}(0) = f(X_s)$, где $X_s = x_s/l$.

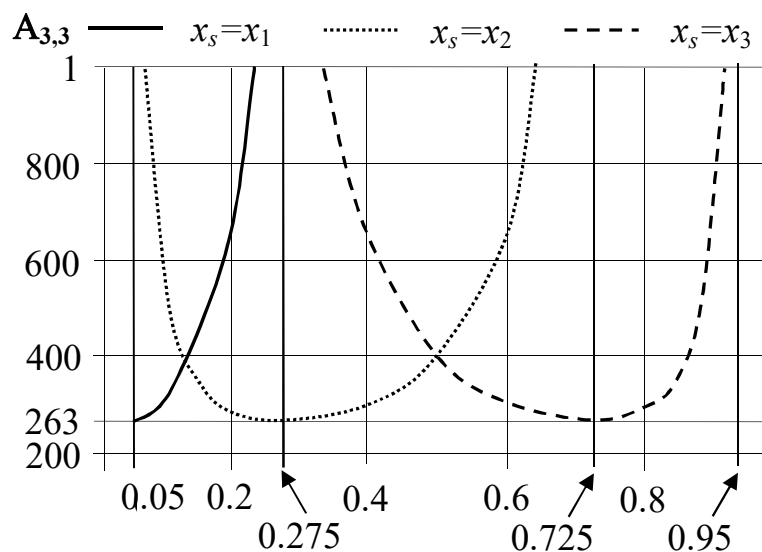


Рис. 1. Безразмерное абсолютное число обусловленности задачи $A_{3,3}$

Fig. 1. Non-dimensional absolute value of the conditionality of the problem $A_{3,3}$

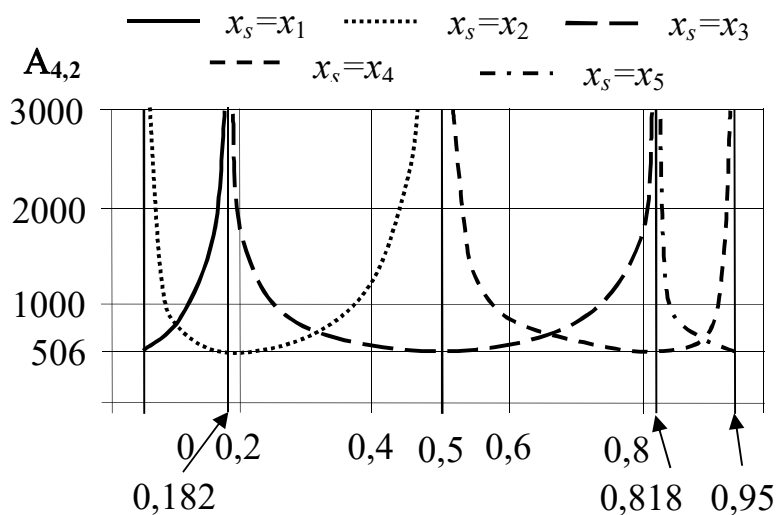


Рис. 2. Безразмерное абсолютное число обусловленности задачи $A_{4,2}$

Fig. 2. Non-dimensional absolute value of the conditionality of the problem $A_{4,2}$

Минимальные значения функций на полученных графиках показывают зависимость погрешности Метода от погрешности датчиков с оптимальными узлами сетки аппроксимации (14) и (16). Графики показывают преимущество координат Чебышёвских экстремумов в сетке аппроксимации в сравнении с другими распределениями коор-

динат, абсолютное число обусловленности задачи и соответственно погрешность решения задачи значительно возрастает при отклонении координат узлов сетки аппроксимации от координат Чебышёвских экстремумов. Отклонение координат до половины текущего шага сетки двукратно увеличивает погрешность определения начальных условий.

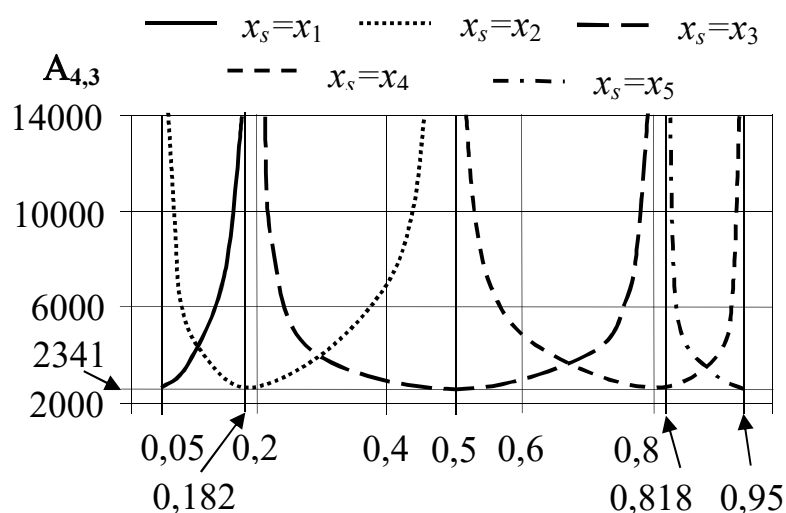


Рис. 3. Безразмерное абсолютное число обусловленности задачи $A_{4,3}$

Fig. 3. Non-dimensional absolute value of the conditionality of the problem $A_{4,3}$

Выводы

1. Разработан экспериментально-расчетный Метод определения начальных условий обратной задачи Коши на основе предложенных характеристик размещения сетки аппроксимации на исследуемом объекте с учетом недоступных для измерения участков, характеристик сетки аппроксимации с координатами Чебышёвских экстремумов для координат узлов, характеристик параметра регуляризации задачи в виде аппроксимационной константы.

2. Исследована реакция Метода на отклонение координат узлов сетки ап-

проксимации от координат Чебышёвских экстремумов – точек чебышёвского альтернанса. Показано, что отклонение координат до половины текущего шага сетки двукратно увеличивает погрешность определения начальных условий.

3. Приведенный Метод может использоваться не только в вычислительной математике, но и в ее технических приложениях, например, для повышения точности методик обследования строительных объектов на стадии экспериментально-теоретических исследований, что является актуальным и полезным.

Список литературы

1. Локтионов А. П. Численное дифференцирование в модели измерений // *Измерительная техника*. 2019. № 8. С. 14-19. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-8-14-19>.
2. Локтионов А.П., Максимов Ю.А., Титов В.С. О численном дифференцировании в обратной задаче Коши // *Сварка и родственные технологии в машиностроении и*

электронике: сборник научных тр. Вып. 4. Курск, 2002. С. 263-268. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21788616>. (дата обращения: 20.04.2021).

3. Ahnert K., Abel M. Numerical differentiation of experimental data: local versus global methods // *Computer Physics Communications*. 2007. Vol. 177(10). P. 764-774. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.03.009>.

4. Локтионов А. П. *Структурная регуляризация подсистемы преобразовательного компонента преобразовательно-вычислительных систем*. Курск, 2009. 323 с.

5. Stickel J.J. Data smoothing and numerical differentiation by a regularization method // *Computers & Chemical Engineering*. 2010. Vol. 34(4). P. 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.10.007>.

6. Перельмутер А.В. Обратные задачи строительной механики // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. Т. 22(4). С. 83-101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>.

7. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. *Численные методы*. М.: Лаборатория знаний, 2020.

8. Сирая Т. Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели // *Измерительная техника*. 2018. № 1. С. 9-14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-1-9-14>.

9. Jang T.S., Han S.L. Numerical experiments on determination of spatially concentrated time-varying loads on a beam: an iterative regularization method // *The Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. Vol. 23(10). P. 2722-2729. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-009-0735-3/>. (дата обращения 20.04.2021).

10. Danchenko V.I., Kondakova E.N. Chebyshev's alternance in the approximation of constants by simple partial fractions // *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2010. Vol. 270(1). P. 80–90. <https://doi.org/10.1134/s0081543810030065>.

11. Копит Т.А., Чуличков А.И., Устинин Д. М. Эмпирическое восстановление нечеткой модели эксперимента и редукция измерений в равномерной метрике // *Вычислительные методы и программирование*. 2011. Т. 12. С. 90-96. URL: http://nummeth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2011/pdf/v12r111.pdf. (дата обращения 20.04.2021).

12. Cheney E.W., Kincaid D.R. *Numerical Mathematics and Computing*. Belmont. California. USA: Thomson Brooks/Cole; 2013.

13. Chekushkin V.V., Mikheev K.V. Fast search algorithms for the best approximation polynomials for reproduction of functional dependences in data-measurement systems // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59(4). P. 351-356. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0970-9>.

14. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O., Breus I.V. Approximation methods for the actual trajectory of load carried by overhead crane to the required one – a comparative analysis // *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2016.

Vol. 10(2). P. 45-56. URL: http://www.sscm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol10No2/Vol10No2_05.pdf. (дата обращения: 20.04.2021).

15. Loktionov A.P. A measuring system for determination of a cantilever beam support moment // *Smart Structures Systems*. 2017. Vol. 19(4). P. 431-439. <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.4.431>.

16. Verbrugge M.W., Wampler C.W., Baker D.R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data // *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165(16). P. A4000-A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816jes>.

17. Кудрявцев К.Я. Алгоритм построения полинома наилучшего равномерного приближения по экспериментальным данным // *Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2019. Т. 8(5). С. 480-486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.

18. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays // *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)"*. October 15-16, 2020. Moscow. Russia. P. 1-13. URL: http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip_paper25.pdf. (дата обращения 20.04.2021).

19. Панферов С.В., Панферов В.И. Численная аппроксимация конвективного граничного условия для сеток с подвижными узлами // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2015. Т. 15. № 4. С. 13–18. <https://doi.org/10.14529/power150402>. URL: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/7282/2.pdf?sequence=1&isAllowed=>.

20. Loktionov A.P. Improving the polynomial approximation of an object characteristic that is not directly measurable by using measurement reduction // *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 59(10). P. 1042-1050. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1089-3>.

21. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids // *Structural Control and Health Monitoring*. 2018. Vol. 5(6). <https://doi.org/0.1002/stc.2160>.

22. Данилов М.Ф., Савельева А.А. Анализ исходных данных неустойчивых задач координатных измерений геометрических параметров деталей // *Измерительная техника*. 2018. № 6. С. 41-45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-6-41-45>.

23. Loktionov A.P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures // *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2018. Vol. 12(2). P. 53-71. <https://doi.org/10.24874/jsscm.2018.12.02.04>.

24. Daili N., Guesmia A. Remez algorithm applied to the best uniform polynomial approximations // *General Mathematics Notes*. 2013. Vol. 17(1). P. 16-31. URL: <http://>

25. Hoang N.S. On node distributions for interpolation and spectral methods // arXiv: 1305.6104v1 [math.NA]. 27 May 2013. 2013. P. 1-18. Cornell University. URL: <https://arxiv.org/abs/1305.6104v1>. (дата обращения 20.04.2021).

26. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // *Journal of Inequalities and Applications*. 2016:93. P. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.

27. Шакиров И.А. Полное исследование функций Лебега, соответствующих классическим интерполяционным полиномам Лагранжа // *Известия вузов. Математика*. Гос. номер статьи по НТИЦ "Информрегистр" 0421100123\0109. 2011. №10. С. 80–88. URL: http://www.ksu.ru/journals/izv_vuz/. (дата обращения 20.04.2021).

28. Байдакова Н.В. Оценка снизу функции Лебега интерполяционного процесса алгебраическими многочленами по равномерным узлам симплекса // *Математические заметки*. 2012. Т. 92. № 1. С. 19-26. <https://doi.org/10.4213/mzm8965>. URL: <http://www.mathnet.ru/links/b65d1e3cffe7d4a08483b370ed70849a/mzm8965.pdf>.

29. Лалин В.В., Беляев М.О. Изгиб геометрически нелинейного консольного стержня. Решение по теориям Кирхгофа и Коссера – Тимошенко // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. Т. 53. № 1. С. 39-55. <https://doi.org/10.5862/MCE.53.5>. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1\(53\)/05.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1(53)/05.pdf).

30. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 64(4). Pp. 40–51. DOI: 10.5862/MCE.64.4. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4\(64\)/04.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4(64)/04.pdf).

31. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. Vol. 73(5). Pp. 25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5\(73\)/03.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5(73)/03.pdf) (дата обращения 20.04.2021).

32. Кашеварова Г.Г., Тонков Ю.Л., Тонков И.Л. Интеллектуальная автоматизация инженерного обследования строительных объектов // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13(3). Pp. 42–57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.

33. A wireless passive sensing system for displacement/strain measurement in reinforced concrete members / B. Ozbey, V.B. Erturk, H.V. Demir, A. Altintas, O.A. Kurc // *Sensors*. 2016. Vol. 16(4). Pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/s16040496>.

34. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network / M.E. Haque, M.F.M. Zain, M.A. Hannan, M.H. Rahman // *Smart Structures and Systems*. 2015. Vol. 16(4). Pp. 607-621. <https://doi.org/10.12989/sss.2015.16.4.623>.

References

1. Loktionov A. P. Chislennoe differentsirovanie v modeli izmerenii [Numerical differentiation in the measurement model]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2019, no. 8, pp. 14-19. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-8-14-19>.
2. Loktionov A. P., Maksimov Yu.A., Titov V.S. [Numerical differentiation in the inverse Cauchy problem]. *Svarka i rodstvennyye tekhnologii v mashinostroyenii i elektronike. Sbornik nauchnykh tr.* Is. 4. Kursk, 2002, pp. 263-268. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21788616>. (accessed 20.04.2021).
3. Ahnert K., Abel M. Numerical differentiation of experimental data: local versus global methods. *Computer Physics Communications*. 2007, vol. 177(10), pp. 764-774. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.03.009>.
4. Loktionov A. P. *Strukturnaya regularizatsiya podsistemy preobrazovatel'nogo komponenta preobrazovatel'no-vychislitel'nykh sistem* [Structural regularization of the subsystem of the converting component of converting computing systems]. Kursk, 2009.
5. Stickel J.J. Data smoothing and numerical differentiation by a regularization method. *Computers & Chemical Engineering*, 2010, vol. 34(4), pp. 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.10.007>.
6. Perelmuter A.V. Obratnye zadachi stroitel'noi mekhaniki [Inverse problems of structural mechanics]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2020, vol. 22(4), pp. 83-101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>.
7. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. Moscow, Laboratoriya-znaniy Publ., 2020.
8. Siraya T. N. Metody obrabotki dannykh pri izmereniyakh i metrologicheskie modeli [Methods of data processing in measurements and metrological models]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*. 2018, no. 1, pp. 9-14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-1-9-14>.
9. Jang T.S., Han S.L. Numerical experiments on determination of spatially concentrated time-varying loads on a beam: an iterative regularization method. *The Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, no. 23(10), pp. 2722-2729. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-009-0735-3>. (accessed 20.04.2021).
10. Danchenko V.I., Kondakova E.N. Chebyshev's alternance in the approximation of constants by simple partial fractions. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2010, no.270(1), pp. 80–90. <https://doi.org/10.1134/s0081543810030065>.
11. Kopit T.A., Chulichkov A.I., Ustinin D. M. Empiricheskoe vosstanovlenie nechetkoi modeli eksperimenta i reduktsiya izmerenii v ravnomernoi metrike [Empirical reconstruction of a fuzzy model and the reduction of measurements in Euclidean metric]. *Vychislitel'nye-metody-i-programmirovaniye = Numerical Methods and Programming*, 2011, vol. 12,

pp. 90-96. Available at: http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2011/pdf/v12r111.pdf. (accessed 20.04.2021).

12. Cheney E.W., Kincaid D.R. *Numerical Mathematics and Computing*. Belmont. California. USA: Thomson Brooks/Cole; 2013.

13. Chekushkin V.V., Mikheev K.V. Fast search algorithms for the best approximation polynomials for reproduction of functional dependences in data-measurement systems. *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59(4), pp. 351-356. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0970-9>.

14. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O., Breus I.V. Approximation methods for the actual trajectory of load carried by overhead crane to the required one – a comparative analysis. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2016, vol. 10(2), pp. 45-56. Available at: http://www.sscm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol10No2/Vol10No2_05.pdf. (accessed 20.04.2021).

15. Loktionov A.P. A measuring system for determination of a cantilever beam support moment. *Smart Structures Systems*. 2017, vol. 19(4), pp. 431-439. <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.4.431>.

16. Verbrugge M.W., Wampler C.W., Baker D.R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, vol. 165(16), pp. A4000-A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816jes>.

17. Kudryavcev K.Ya. Algoritm postroeniya polinoma nailuchshego ravnomernogo priblizheniya po eksperimental'nym dannym [Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data]. *Vestnik nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI = Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI"*. 2019, vol. 8(5), pp. 480-486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.

18. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)"*. October 15-16, 2020, Moscow. Russia. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2830/paper25.pdf>. (accessed 20.04.2021).

19. Panferov S.V., Panferov V.I. Chislennaya approksimatsiya konvektivnogo granichnogo usloviya dlya setok s podvizhnymi uzlami [Numerical approximation of the convective boundary condition for grids with moving nodes]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta: Seria Energetika = Bulletin of the South Ural State University: Series Power Engineering*, 2015, vol. 15(4), pp. 13-18. <https://doi.org/10.14529/power150402>. Available at: <https://dSPACE.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/7282/2.pdf?sequence=1&isAllowed=>.

20. Loktionov A.P. Improving the polynomial approximation of an object characteristic that is not directly measurable by using measurement reduction. *Measurement Techniques*. 2017, vol. 59(10), pp. 1042-1050. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1089-3>.

21. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids. *Structural Control and Health Monitorin*, 2018, vol. 5(6). p.2160. <https://doi.org/10.1002/stc.2160>.

22. Danilov M.F., Savelyeva A.A. Analiz iskhodnykh dannyykh neustoichivyykh zadach koordinatnykh izmerenii geometricheskikh parametrov detalei [Analysis of the initial data of unstable problems of coordinate measurements of geometric parameters of parts]. *Izmeritel'naya texnika = Measurement Techniques*, 2018, no. 6, pp. 41-45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-6-41-45>.

23. Loktionov A.P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2018, vol. 12(2), pp. 53-71. <https://doi.org/10.24874/jsscm.2018.12.02.04>.

24. Daili N., Guesmia A. Remez algorithm applied to the best uniform polynomial approximations. *General Mathematics Notes*, 2013, vol. 17(1), pp. 16-31. Available at: http://emis.impa.br/EMIS/journals/GMN/volumes/vol_17_no_1_july_2013.html. (accessed 20.04.2021).

25. Hoang N.S. On node distributions for interpolation and spectral methods. *ArXiv: 1305.6104v1 [math.NA]*. 27 May 2013, 2013, pp.1-18. Cornell University. Available at: <https://arxiv.org/abs/1305.6104v1>. (accessed 20.04.2021).

26. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation. *Journal of Inequalities and Applications*, 2016, vol. 93, <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.

27. Shakirov I.A. Polnoe issledovanie funktsii Lebega, sootvetstvuyushchikh klassicheskim interpolatsionnym polinomam Lagranzha [Complete investigation of Lebesgue functions corresponding to classical Lagrange interpolation polynomials]. *Izvestiya-vuzov-matematika = Russian Mathematics (Iz. VUZ)*. gos-nomer-stati-po-ntts-informregistr-0421100123\0109, 2011, no. 10, pp. 80-88. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/fe83b09ef6d61002e4f386c4ad5e6a19/ivm8104.pdf>. (accessed 20.04.2021).

28. Baydakova N.V. Otsenka snizu funktsii Lebega interpolatsionnogo protsessa algebraicheskimi mnogochlenami po ravnomernym uzlam simpleksa [Lower bound for the lebesgue function of an interpolation process with algebraic polynomials on equidistant nodes of a simplex]. *Matematicheskite zametki = Mathematical Notes*, 2012, vol. 92(1), pp. 19-26. <https://doi.org/10.4213/mzm8965>. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/b65d1e3cffe7d4a08483b370ed70849a/mzm8965.pdf>.

29. Lalin V.V., Belyayev M.O. Izgib geometricheski nelineinogo konsol'nogo sterzhnya. Reshenie po teoriyam Kirkhgofa i Kossera – Timoshenko [Bending of geometrically nonlin-

ear cantilever beam. Results obtained by Cosserat – Timoshenko and Kirchhoff's rod theories]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 2015, vol. 53(1), pp. 39-55. <https://doi.org/10.5862/MCE.53.5>. Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1\(53\)/05.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/1(53)/05.pdf).

30. Tushina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, vol. 64(4), pp. 40-51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>. Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4\(64\)/04.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/4(64)/04.pdf).

31. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017, vol. 73(5), pp. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>. Available at: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5\(73\)/03.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/5(73)/03.pdf).

32. Kashevarova G. G., Tonkov, Y. L., Tonkov I.L. Intel'ktual'naya avtomatizatsiya inzhenernogo obsledovaniya stroitel'nykh ob'ektov [Intellectual automation of engineering survey of building objects. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, vol. 13(3), pp. 42-57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.

33. Ozbey B., Erturk V.B., Demir H.V., Altintas A., Kurc O.A. A wireless passive sensing system for displacement/strain measurement in reinforced concrete members. *Sensors*. 2016, vol. 16(4), pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/s16040496>.

34. Haque M.E., Zain M.F.M., Hannan M.A., Rahman M.H. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network. *Smart Structures and Systems*. 2015, vol. 16(4), pp. 607-621. <https://doi.org/10.12989/ss.2015.16.4.623>.

Информация об авторе / Information about the Author

Локтионов Аскольд Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: loapa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4185>, Researcher ID: P-5434-2015

Askold P. Loktionov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: loapa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4185>, Researcher ID: P-5434-2015

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-103-119>

Моделирование системы управления исполнительных звеньев реабилитационного экзоскелета с учетом эффекта спастичности

С.Ф. Яцун¹, А.В. Мальчиков¹, А.А. Постольный¹, А.С. Яцун¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Математическое моделирование адаптивной системы управления реабилитационного экзоскелетного комплекса, позволяющей учитывать эффекты взаимодействия человека с исполнительными звеньями приводной системы, в том числе детектировать появление эффекта спастичности. Для достижения поставленной цели авторами работы решаются следующие задачи: разработка концепции человеко-машинного взаимодействия, описание информационной инфраструктуры экзоскелетного комплекса; разработка структуры адаптивной системы управления, позволяющей учитывать взаимодействие человека с роботом в процессе движения; разработка математической модели человеко-машинной системы (ЧМС) и постановка вычислительных экспериментов с целью отработки алгоритмов адаптивного управления при различных условиях, разработка метода детектирования явления спастичности и алгоритма адаптивной системы управления, обеспечивающего безопасность пациента.

Методы. При построении математической модели ЧМС учитываются биомеханические и физиологические свойства объекта манипулирования, механические свойства силовых элементов конструкции, а также особенности работы информационной системы электромеханического устройства. В работе используется математическая модель, представленная системой дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих динамику совместного движения исполнительных звеньев экзоскелета и конечности оператора.

Результаты. В ходе численного моделирования получены временные диаграммы изменения углов поворота звеньев экзоскелета и ноги оператора, законы изменения крутящих моментов в шарнирах и усилия на манжетах, характеризующие человеко-машинное взаимодействие при различных режимах и условиях функционирования устройства.

Заключение. На основании полученных результатов математического моделирования функционирования ЧМС сделаны выводы о применимости предлагаемых алгоритмов адаптивной системы управления при различных режимах и условиях функционирования экзоскелетного комплекса, в том числе для реабилитации пациентов с возможностью возникновения спастичности.

Ключевые слова: человеко-машинная система; система управления; адаптивное управление; коллаборативная робототехника; экзоскелет.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта президента проект № МК-780.2020.8

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

© Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Постольный А.А., Яцун А.С., 2021

Для цитирования: Моделирование системы управления исполнительных звеньев реабилитационного экзоскелета с учетом эффекта спастичности / С.Ф. Яцун, А.В. Мальчиков, А.А. Постольный, А.С. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 103-119. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-103-119>.

Поступила в редакцию 10.08.2021

Подписана в печать 04.10.2021

Опубликована 21.10.2021

Simulation of Control System of Executive Links of Rehabilitation Exoskeleton Considering Spasticity Effect

Sergey F. Jatsun¹, Andrei V. Malchikov¹, Alexey A. Postolny¹,
Andrey S. Yatsun¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Mathematical modeling of the adaptive control system of the rehabilitation exoskeleton complex, which allows considering the effects of human interaction with the actuators of the drive system, including detecting the appearance of the spasticity effect. The authors of this work solve the following problems: development of human-machine interaction concept, description of the information infrastructure of the exoskeleton complex; development of a structure of an adaptive control system that allows to take into account the interaction of a person with a robot in the process of movement; development of a mathematical model of a man-machine system (MMS) and setting up computational experiments in order to develop adaptive control algorithms under various conditions, development of a method for detecting a spasticity phenomenon and an algorithm of an adaptive control system providing patient safety.

Methods. When constructing a mathematical model of the MMS, biomechanical and physiological properties of the manipulation object, mechanical properties of power elements of the structure, as well as features of the operation of the information system of electromechanical device are considered. The work uses mathematical model represented by a system of differential equations of the second order, describing the dynamics of the joint movement of executive links of the exoskeleton and the limb of the operator.

Results. During numerical simulation time diagrams of rotation angles changes of exoskeleton links and operator's leg, laws of torques changes in hinges and forces on cuffs characterizing man-machine interaction under various modes and conditions of device functioning are obtained.

Conclusion. Conclusions were drawn on applicability of the proposed algorithms of adaptive control system under various modes and conditions of exoskeleton complex functioning, including for rehabilitation of patients with the possibility of spasticity. The conclusions were drawn based on the obtained results of mathematical modeling of MMS functioning.

Keywords: man-machine system; control system; adaptive management; collaborative robotics; exoskeleton.

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

Funding: The study was carried out with the financial support of the presidential grant project №. MK-780.2020.8.

For citation: Jatsun S. F., Malchikov A. V., Postolny A. A., Yatsun A. S. Simulation of Control System of Executive Links of Rehabilitation Exoskeleton Considering Spasticity Effect. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo univer-*

Введение

С каждым годом робототехнические устройства становятся все более интеллектуальными и сложными по своей структуре и управлению. Появляются устройства, принцип работы которых основан на непосредственном взаимодействии с человеком-оператором. Ярким примером таких сложных человеко-машинных систем (ЧМС) являются различные экзоскелетные системы механотерапевтического применения. Важную роль при создании таких устройств играет оценка и учет эффектов взаимодействия между робототехническим устройством и машиной. Для этого разработаны различные методики: использование нейроинтерфейсов с инвазивными или неинвазивными датчиками электрической активности его мозга [1-2], использование датчиков мышечной активности [3-4], применение внешних систем технического зрения, получение данных непосредственно с помощью силомоментных датчиков и датчиков относительного движения [5-9]. Нейроинтерфейсы и мио-датчики получили наибольшее распространение в медицинских устройствах, так как возможна одновременная стимуляция при выполнении упражнения. Такие устройства сложны, требуют тщательной настройки, дорогостоящи и не всегда подходят для

каждодневного использования в формате коротких сеансов механотерапии [2]. Внешние измерители: камеры, дальномеры и т.д. часто не дают нужной точности, могут использоваться для внешнего контроля выполнения упражнения, но не всегда применимы для задач роботизированной реабилитации. Наиболее перспективным для роботизированных ЧМС видятся кинестетические датчики, непосредственно фиксирующие взаимодействие человека и устройства.

Использование измерительных комплексов, включающих датчики перемещения, позволяют создавать высокоточные приводные системы, обеспечивающие требуемые параметры движения исполнительных звеньев механизма. Датчики усилий, располагаемые в местах крепления пациента к устройству, дают информацию о взаимодействии пациента и робота – регистрируют силы сопротивления движению, что может свидетельствовать о болевом синдроме у пациента, о спастичности сустава [10-11] и других явлениях, которые необходимо контролировать в процессе проведения процедуры.

Использование сложного комплекса измерительных средств предполагает наличие систем сбора, обработки, интерпретации, анализа и хранения данных с одновременным выводением регистрируемых параметров на интерфей-

сы пациента, оператора (врача-реабилитолога), сохранении в базах данных, необходимых для последующего анализа эффективности выполняемых упражнений.

Важную роль при разработке систем управления ЧМС системами играет наличие различных систем защиты, обработчиков нештатных ситуаций, быстрого реагирования на состояние пациента и устройства. Для этого алгоритмы управления должны включать блоки экстренного отключения, контроля усилий, защиты на программном, электротехническом и механическом уровнях.

Не менее важно, при ЧМС, в том числе медицинского применения, наличие интуитивно-понятного пользовательского интерфейса, комфортных элементов управления и контроля выполнения упражнения. Программная оболочка реабилитационного устройства должна позволять пользователям выби-

рать и настраивать режимы работы устройства, контролировать ход выполнения упражнения, аварийно прерывать или останавливать работу устройства в случае нештатной ситуации. При этом информация, представленная пользователям, в зависимости от их роли (пациент или врач), должна быть удобна для восприятия, не отвлекать от упражнения, но при этом достаточна для определения эффективности процедуры и обнаружения негативных изменений состояния пациента.

Материалы и методы

В рамках исследования предлагается многоконтурная иерархическая структура системы управления устройством, предполагающая высокоскоростной обмен информацией внутри инфраструктуры реабилитационного комплекса (РК), схема которой показана на рис.1.

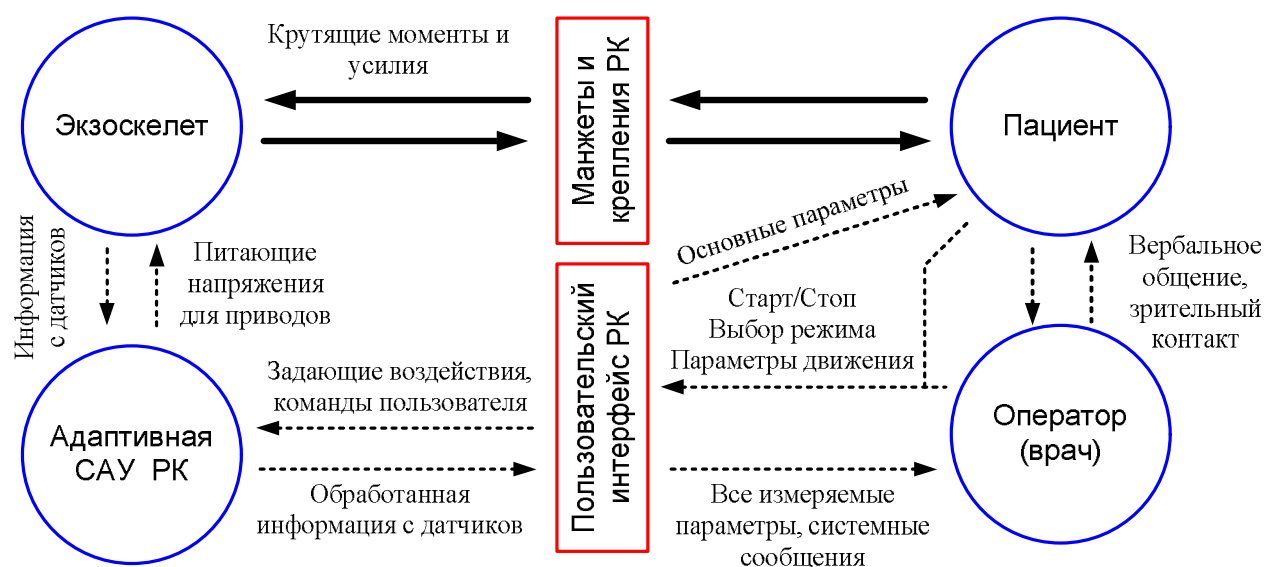


Рис. 1. Функциональная схема информационной системы РК

Fig. 1. Functional diagram of RK information system

На данной схеме ЧМС можно выделить отдельно: экзоскелет, получающий сигналы от адаптивной системы автоматического управления (САУ); пациент, одновременно взаимодействующий с устройством как механически, посредством манжет и креплений, так и программно, меняя режимы работы и параметры движения устройства и оператора, имеющего более глубокий контроль системы управления, но при этом не способного механически изменять (корректировать) ход выполнения упражнения.

Как видно из функциональной схемы, обмен информацией между пользователями и устройством осуществляется через интерфейсы: программные (пульты управления, мониторы, джойстики) и

механические (измерительные манжеты, привязь, ремни креплений).

Особенностью рассматриваемого устройства является использование измерительной манжеты, обладающей нелинейными упругими свойствами, позволяющей измерять с высокой точностью усилия, возникающие между экзоскелетом и пациентом, но при этом способной выдержать большую нагрузку со стороны пользователя. Такая ситуация может возникнуть, например, когда пациент занимает сидячее положение в экзоскелете, то практически вся масса пациента приходится на бедренные манжеты. Для обеспечения высокой точности измерения и требуемой прочности и жесткости конструкции предлагается оригинальная конструкция, схема и 3Д-модель которой показаны на рис.2.

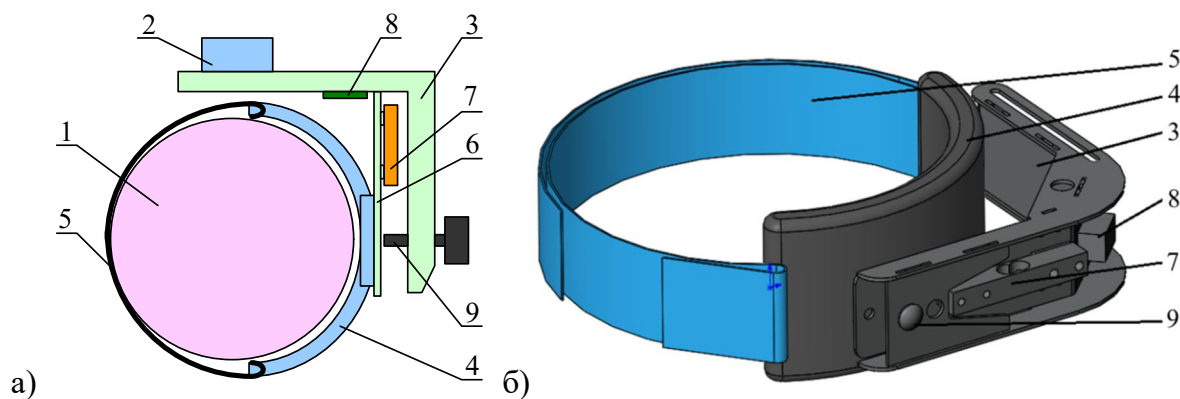


Рис. 2. Бедренная измерительная манжета: 1 – нога пациента; 2 – бедренное звено экзоскелета; 3 – силовой каркас манжеты; 4 – мягкое основание (подушка); 5 – фиксирующая текстильная стропа; 6 – деформируемая часть манжеты; 7 – тензодатчик YZC131-5кг; 8 – модуль АЦП НХ711; 9 – регулируемый упор

Fig. 2. Femoral measuring cuff: 1 – patient's leg, 2 – femoral link of the exoskeleton, 3 – frame of the cuff; 4 – soft support (pillow); 5 – fixing textile sling; 6 – deformable part of the cuff; 7 – strain gauge YZC131-5kg; 8 – ADC module HX711, 9 – adjustable limiter

Принцип работы измерительной манжеты заключается в следующем. При создании усилий со стороны пациента 1, чувствительный элемент тензодатчика 7 регистрирует появляющиеся усилия при деформации каркаса манжеты. Датчик при этом располагается в измерительной – ослабленной части манжеты 6, что позволяет регистрировать даже незначительные усилия. Однако, когда деформация измерительной части манжеты превышает заданную настраиваемую величину, пластина 6 упирается в регулируемый упор-ограничитель 9, закрепленный в силовом каркасе манжеты 3, что перераспределяет нагрузку в системе и разгружает

датчик. Наличие резьбы на регулируемом упоре позволяет осуществить точную настройку ограничителя, а параметры измерительной части (геометрия, материал) позволяют подобрать требуемые параметры масштабирования показаний тензодатчика. Таким образом, использование регулируемого ограничителя хода измерительной части манжеты обуславливает нелинейные упругие свойства узла.

Кроме датчиков усилия устройство экзоскелета оснащено датчиками угла поворота в каждом активном сочленении робота. Структура системы управления движением исполнительных звеньев РК показана на рис. 3.

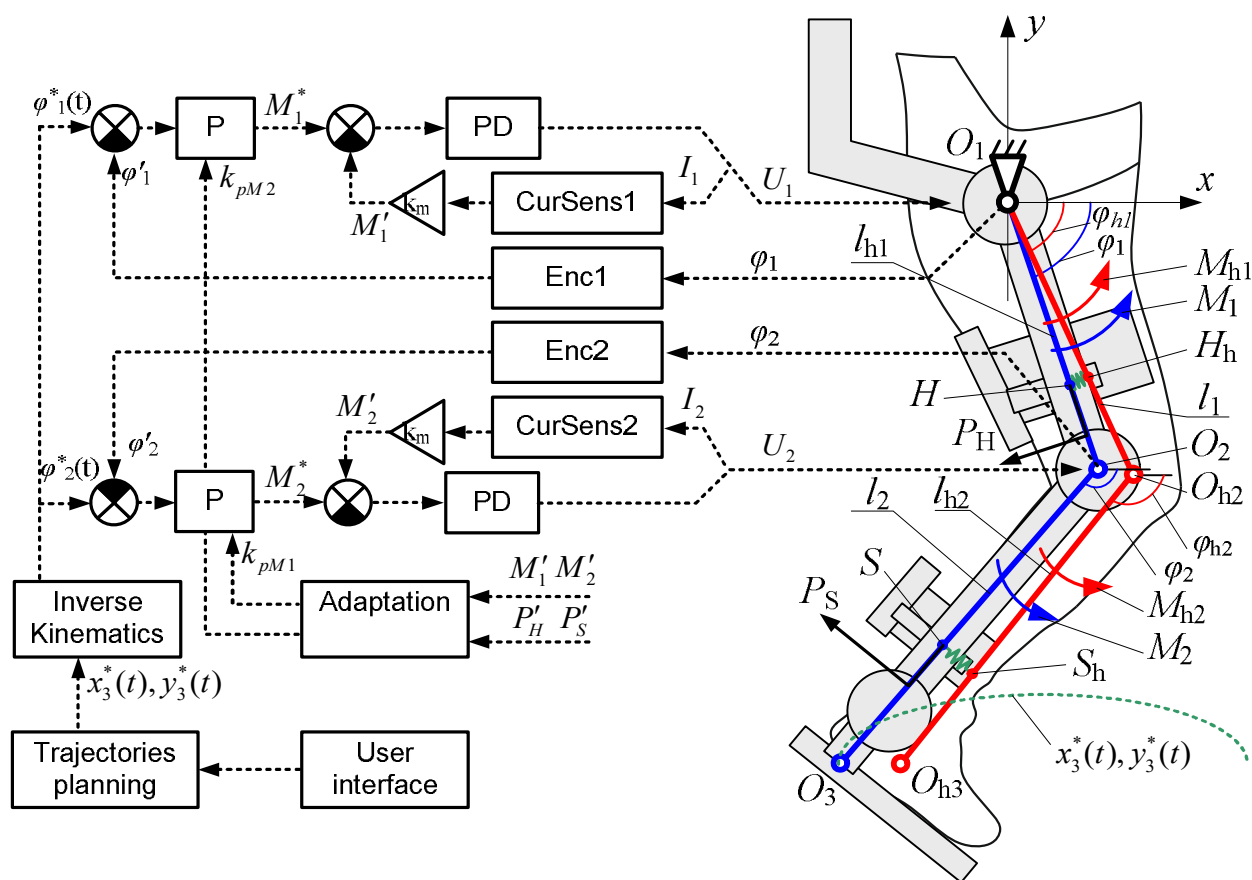


Рис. 3. Структура системы управления ноги экзоскелета

Fig. 3. Structure scheme of the exoskeleton leg control system

На данной схеме: l_1, l_2 – соответственно звенья бедра и голени экзоскелета, l_{h1}, l_{h2} – отрезки между центрами суставов оператора, соответственно, между коленным суставом O_{h2} и голеностопным O_{h3} и коленным и тазобедренным O_1 ; φ_1, φ_2 – абсолютные углы поворота звеньев экзоскелета; $\varphi_{h1}, \varphi_{h2}$ – углы поворота голени и бедра оператора. Перемещение звеньев экзоскелета происходит под действием крутящих моментов M_1, M_2 , развиваемых приводной системой экзоскелета. Нога экзоскелета закреплена в точке O_1 , которая совпадает с началом координат неподвижной системы отсчета. Нога оператора и звенья экзоскелета соединяются посредством бедренной и голенной измерительных манжет. Как говорилось ранее, манжеты содержат датчики, регистрирующие величины усилий P_H и P_S между ногой пациента и звеном экзоскелета.

Задача управления сводится к отработке требуемой траектории движения, с учетом сил человеко-машинного взаимодействия и моментов на приводах.

Приведем описание алгоритма функционирования системы управления. Пациент или оператор РК выбирает необходимый режим и параметры упражнения, запускает выполнение. Далее блок

построения траектории производит синтез законов изменения координат шарнира стопы x_3^*, y_3^* . При этом осуществляется контроль усилий в манжетах и значения силы тока в якорных обмотках двигателя. Затем значения требуемых координат x_3^*, y_3^* передается в блок определения задающих углов для системы управления приводами φ_1^*, φ_2^* . Требуемые углы поворота подаются на вход двухконтурной системы управления, где формируются управляющие напряжения для электродвигателей экзоскелета:

$$U_i = k_{pM} (M_i^* - M_i'), \quad (1)$$

где $M_i^* = k_{p\varphi} (\varphi_i^* - \varphi_i')$ – задающий момент на i -том приводе; $M_i' = k_m I_i$ – измеренный момент на i -том приводе; k_{pM} – коэффициент П-регулятора контура управления по моменту; $k_{p\varphi}$ – коэффициент П-регулятора контура по углу поворота; φ_i^* – желаемый угол поворота; φ_i' – измеренный угол поворота i -того звена; k_m – моментный коэффициент двигателя, определяемый параметрами двигателя и редуктора; I_i – якорный ток на i -том приводе.

При этом φ_i^* определяется при решении обратной задачи кинематики следующим образом:

$$\varphi_1 = \begin{cases} \arctng \left(\frac{y_3}{x_3} \right) + \arccos \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + (x_3^2 + y_3^2)}{2l_1 \sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \right) & \text{if } (x_3 > 0) \\ \arctng \left(\frac{y_3}{x_3} \right) + \arccos \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + (x_3^2 + y_3^2)}{2l_1 \sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \right) - \pi & \text{if } (x_3 \leq 0) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \left(\pi + \arccos \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - (x_3^2 + y_3^2)}{2l_1 l_2} \right) \right). \quad (3)$$

Использование уравнений (2) и (3) позволяет определить абсолютные углы поворота звеньев при движении точки O_3 в нижних квадрантах координатной плоскости ($y_3 < 0$).

Для подбора коэффициентов регуляторов, настройки системы аварийной остановки и прочих параметров системы необходимо выполнить математическое моделирование системы управления исполнительных звеньев реабилитационного комплекса.

Так как контуры управления для левой и правой ноги одинаковые и отличаются только фазами траекторий, то при моделировании ограничимся описанием одной ноги. Также в качестве допущений не будем рассматривать взаимодействие стопы пациента и соответствующих узлов экзоскелетного комплекса. Действи-

тельно, во многих реабилитационных устройствах, предназначенных для имитации ходьбы, и реабилитации тазобедренного и коленного суставов, голеностопный шарнир не содержит приводов, стопа просто фиксируется на упругих элементах, обеспечивающих комфорт пациента [12].

Таким образом нога экзоскелета и нога пациента могут быть представлены двухкоординатными маятниками с общим основанием и связанными между собой упругими элементами, имитирующими работу манжет. При этом звенья экзоскелета будут приводиться в движение моментами электроприводов, оснащенных исследуемой системой управления.

В таком случае система дифференциальных уравнений, описывающих ногу экзоскелета, будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 l_1 (m_1 + m_2) + \ddot{\varphi}_2 m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_2^2 m_2 l_1 l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) = \\ = M_1 - P_H l_H \sin(\gamma_H - \varphi_1) - P_S l_1 \sin(\gamma_S - \varphi_1) - (m_1 + m_2) d l_1 \sin \varphi_1, \\ \ddot{\varphi}_2 l_2^2 + \ddot{\varphi}_1 m_2 l_1 l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_1^2 m_2 l_1 l_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) = \\ = M_2 - P_S l_S \sin(\gamma_S - \varphi_2) - m_2 g l_2 \sin \varphi_2, \\ L \frac{dI_1}{dt} + R I_1 + k_E \varphi_1 i_G = U_1, M_1 = k_m I_1, \\ L \frac{dI_2}{dt} + R I_2 + k_E \varphi_2 i_G = U_2, M_2 = k_m I_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где m_1, m_2 – массы звеньев экзоскелета, γ_H и γ_S – абсолютные углы приложения усилий со стороны пациента P_H, P_S , определяемые разностью координат точек H, H_h и S, S_h и жесткостью подве-

сов c_H, c_S (рис.4), k_E – скоростной коэффициент двигателя; L и R – индуктивность и активное сопротивление якорной обмотки двигателя.

Для ноги пациента можем записать аналогичные уравнения:

$$\begin{aligned}
& \ddot{\varphi}_{h1} l_{h1}^2 (m_{h1} + m_{h2}) + \ddot{\varphi}_{h2} m_{h2} l_{h1} l_{h2} \cos(\varphi_{h1} - \varphi_{h2}) + \dot{\varphi}_{h2}^2 m_{h2} l_{h1} l_{h2} \sin(\varphi_{h1} - \varphi_{h2}) = \\
& = M_{h1} - P_H l_{hH} \sin(\gamma_{hH} - \varphi_{h1}) - P_S l_{h1} \sin(\gamma_{hS} - \varphi_{h1}) - (m_{h1} + m_{h2}) d l_{h1} \sin \varphi_{h1}, \\
& \ddot{\varphi}_{h2} l_{h2}^2 + \ddot{\varphi}_{h1} m_{h2} l_{h1} l_{h2} \cos(\varphi_{h1} - \varphi_{h2}) - \dot{\varphi}_{h1}^2 m_{h2} l_{h1} l_{h2} \sin(\varphi_{h1} - \varphi_{h2}) = \\
& = M_{h2} - P_S l_{hS} \sin(\gamma_{hS} - \varphi_{h2}) - m_{h2} g l_{h2} \sin \varphi_{h2},
\end{aligned} \tag{5}$$

где P_{Hx} P_{Hy} P_{Sx} P_{Sy} – проекции усилий, возникающих между оператором и экзоскелетом, соответственно в бедренной и в голеностопной манжете.

В данном случае, задаваясь значениями моментов M_{h1} и M_{h2} , можем моделировать моменты сопротивления в суставах пациента, в том числе явления спастичности, характеризуемого появлением неконтролируемых мышечных сокращений, параличом и гипертенусом мышц [10, 11].

В общем случае:

$$M_{hi} = M'_{hi} + M_{hsi}, \tag{6}$$

где M'_{hi} – момент сопротивления движению ноги пациента под действием внешних сил со стороны экзоскелета (в работе рассматривается как момент вязкого сопротивления $M'_{hi} = \mu_{hi} \dot{\varphi}_i$ в i -том суставе), M_{hsi} – момент, моделирующий

силу сопротивления при проявлении эффекта спастичности в i -том суставе, записанный в соответствии с реологической двухкомпонентной вязкоупругой моделью Кельвина-Фойгта, которая описывает сопротивление мышцы при растяжении в соответствии с уравнением Хилла [14], следующим образом:

$$M_{hsi} = c_{hs} (Q_i - \varphi_i) + \mu_{hs} \dot{\varphi}_i, \tag{7}$$

где c_{hs} и μ_{hs} – коэффициенты упругости и вязкости; Q_i – угол, при котором происходит блокировка i -того сустава из-за явления спастичности.

Результаты и их обсуждение

Выполним численное моделирование системы без учета спастичности ($M_{hsi} = 0$), с основными параметрами, показанными в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели ЧМС

Table 1. Parameters of MMS mathematical model

Наименование параметра / Parameter name	Обозначение / Designation	Значение / Value
Масса бедренного звена экзоскелета	m_1	3.5 кг
Масса звена голени экзоскелета	m_2	4.5 кг
Масса бедра пациента	m_{h1}	11,3 кг *
Масса голени со стопой	m_{h2}	4,65 кг *
Длина бедренного звена экзоскелета	l_1	0,52 м

Наименование параметра / Parameter name	Обозначение / Designation	Значение / Value
Длина звена голени экзоскелета	l_2	0,52 м
Длина бедра пациента	l_{h1}	0,52 м *
Длина бедра голени со стопой	l_{h2}	0,52 м *
Расстояния от бедра до бедренной манжеты	l_{hH}	0,39 м
Расстояния от колена до манжеты на голени	l_{hS}	0,45 м
Коэффициент жесткости подвеса манжеты	c_H, c_S	8 Н/мм
Индуктивность якорной обмотки	L	0,072 мГн
Сопротивление якорной обмотки	R	0,103 Ом
Моментный коэффициент	k_m	0,35 Нм/А
Скоростной коэффициент	k_E	25,9 рад/В·с

* соответствует росту 175см и массе пациента 80кг

На рис. 4 покажем угловые перемещения звеньев экзоскелета и конечности оператора при совершении одного шага, а также крутящие моменты на электроприводах и проекции усилий между экзоскелетом и пациентом обусловленные

инерцией и массой. При этом в качестве траектории возьмем движение характерное для ходьбы с параметрами: ширина шага 0,35 м, высота подъема ноги 0,1 м. Подробно методика задания траектории описана в работе [13].

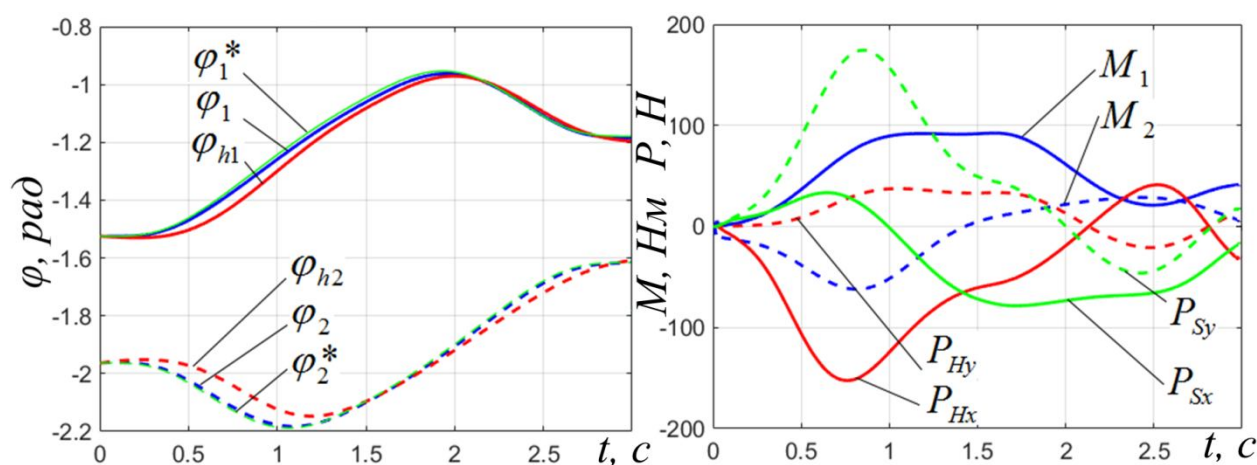


Рис. 4. Результаты моделирования движения ЧМС при $M_{h1} = M_{h2} = 0$

Fig. 4. The results of movement modeling of MMS at $M_{h1} = M_{h2} = 0$

Как видно из результатов моделирования, при совершении шага приводы развивают усилия до 100 Нм, при этом максимальное усилие в 200 Н зафиксировано в голеностопной манжете. Подбор параметров движения и параметры подвеса позволяют снизить усилия и моменты, что может быть полезно при настройке реабилитационного комплекса, однако в рамках данной работы, посвященной отладке алгоритмов адаптивной системы, данные параметры движения и свойства манжеты рациональны.

Покажем результаты моделирования, при котором блокировка бедренного сустава происходит в момент времени $t=1.5c$ (параметры модели момента сопротивления $c_{hs}=1000\text{Нм/рад}$, $\mu_{hs}=100\text{Нмс/рад}$).

Как видно в момент фиксации сустава происходит резкое возрастание моментов на приводах, усилий на ман-

жетах, а также значительно изменяется траектория движения ноги оператора. Отметим, что в данном эксперименте не установлено ограничение по мощности приводной системы, поэтому крутящие моменты достигают значений в 250 Нм для бедренного привода.

Как показали результаты численного моделирования ЧМС, по характеру изменения моментов и усилий можно сказать не только о степени спастичности сустава (о моменте сопротивления со стороны пациента), но и о том, какой сустав заблокирован. Так как важным является момент времени, в котором происходит фиксация сустава, участок траектории, положение звеньев, а также последующий характер движения звеньев экзоскелета, то однозначное распознавание таких явлений представляет сложную задачу.

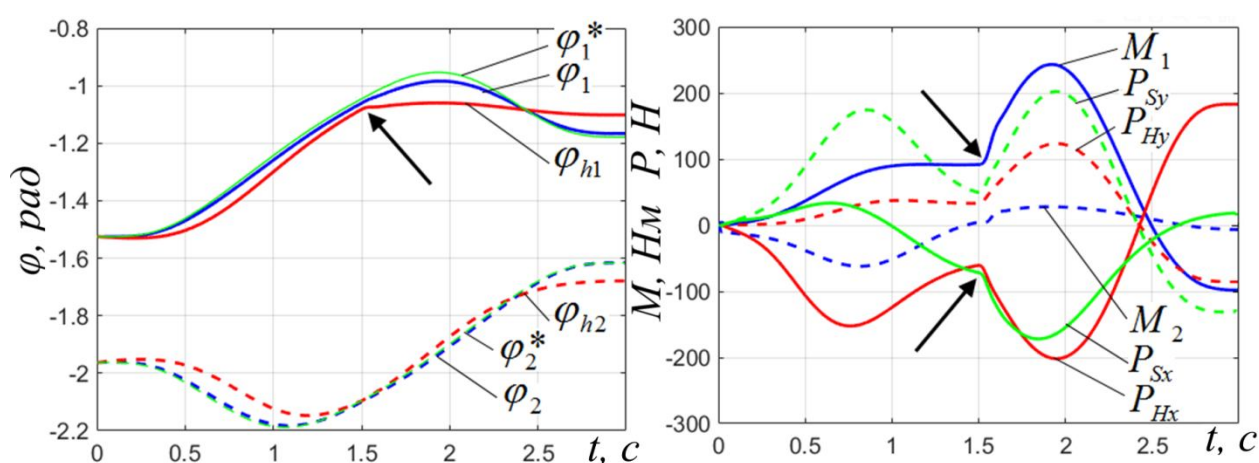


Рис.5. Моделирование ЧМС с блокировкой бедренного сустава (момент фиксации показан стрелкой)

Fig. 5. MMS simulation with blocked hip joint (fixation moment is shown by an arrow)

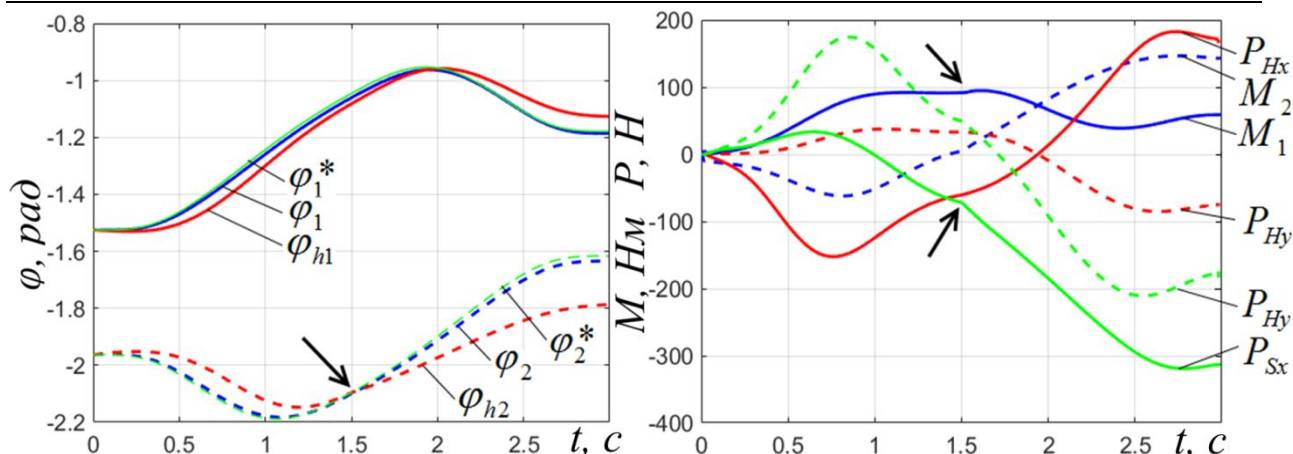


Рис. 6. Моделирование ЧМС с блокировкой в коленном суставе

Fig. 6. MMS simulation with blocked knee joint

В рамках настоящего исследования рассмотрим один из возможных вариантов реализации системы защиты пациента за счет применения адаптивной системы управления приводами, коэф-

$$k_{pM1}(P_S, P_H) = \begin{cases} k_{pM1} = k_{pM} & \text{если: } (|P_S| < P_{S\text{MAX}}) \text{ и } (|P_H| < P_{H\text{MAX}}) \\ \text{иначе: } k_{pM1} = k_{pM} - k_{S1}(P_{S\text{MAX}} - P_S) - k_{H1}(P_{H\text{MAX}} - P_H), \end{cases} \quad (8)$$

$$k_{pM2}(P_S, P_H) = \begin{cases} k_{pM2} = k_{pM} & \text{если: } (|P_S| < P_{S\text{MAX}}) \text{ и } (|P_H| < P_{H\text{MAX}}) \\ \text{иначе: } k_{pM2} = k_{pM} - k_{S2}(P_S - P_{S\text{MAX}}) - k_{H2}(P_H - P_{H\text{MAX}}), \end{cases} \quad (9)$$

где k_{pM1} – адаптивный пропорциональный коэффициент контура управления по моменту; $P_{S\text{MAX}}$ и $P_{H\text{MAX}}$ – предельно допустимые значения усилий на манжетах; k_{Si} k_{Hi} – коэффициенты ослабления адаптивного коэффициента.

Таким образом, пропорционально превышению допустимого усилия на манжете будет ослабляться влияние обратной связи в контуре регулирования крутящего момента, что приведет к ограничению момента и обеспечению безопасности пациента.

фициенты регуляторов которой являются функциями усилий на манжетах или моментов на электроприводах. Для первого случая можно записать:

Покажем результат работы адаптивной системы при блокировке бедренного шарнира на 1,5 с.

Как показали результаты моделирования реакции системы на блокировку бедренного сустава, превышение предельных значений усилий на манжетах, приводит к снижению крутящих моментов приводов, и как следствие ограничению травмирующих усилий со стороны экзоскелета на пациента, однако переходный процесс носит колебательный характер и требует точной настройки параметров регулятора под каждый конкретный режим.

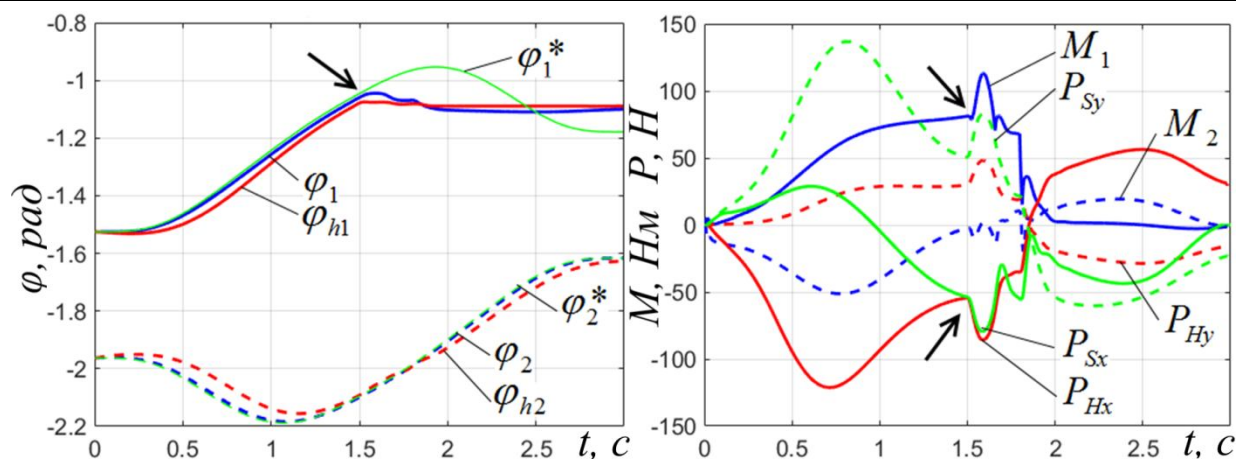


Рис. 7. Моделирование работы адаптивной САУ при блокировке бедренного сустава

Fig. 7. Simulation of ACS adaptive operation in blocking hip joint

Выводы

В работе рассматривается математическая модель человеко-машинной системы, оснащенной адаптивной системой автоматического управления электроприводами. Адаптивная система базируется на использовании измерительных манжет особой конструкции, позволяющей регистрировать значения усилий между оператором и экзоскелетом в процессе движения. Выполнено математическое моделирование ЧМС в режиме одного шага, получены временные закономерности угловых перемещений и крутящих моментов для различных режимов работы системы, в том числе при ис-

пользовании адаптивного регулятора. Как показали результаты моделирования, предлагаемый алгоритм позволяет сократить травматическое действие экзоскелета в момент возникновения тормозных моментов со стороны пациента, которые могут быть обусловлены явлениями спастичности, болевым синдромом или мышечным спазмом. Разработанная математическая модель и алгоритмы адаптивного управления могут быть применены при отладке регуляторов активных экзоскелетных систем, в том числе для реабилитации больных с нарушениями опорно-двигательных функций нижних конечностей.

Список литературы

1. Al-Quraishi M. S. et al. EEG-based control for upper and lower limb exoskeletons and prostheses: A systematic review // Sensors. 2018. T. 18. N.10. P. 3342. <https://doi.org/10.3390/s18103342>
2. Bhagat N. A. et al. Design and optimization of an EEG-based brain machine interface (BMI) to an upper-limb exoskeleton for stroke survivors //Frontiers in neuroscience. 2016. – T. 10. P. 122. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00122>

3. Kawamoto H. et al. Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller //SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483). IEEE, 2003. T. 2. P. 1648-1653. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1244649>
4. Rosen J. et al. A myosignal-based powered exoskeleton system //IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics-part A: Systems and humans. 2001. T. 31. №. 3. P. 210-222. <https://doi.org/10.1109/3468.925661>
5. Jatsun S., Malchikov A., Loktionova O. Modeling of Human-Machine Interaction in an Industrial Exoskeleton Control System //International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, 2020. P.116-125. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_12
6. Aguirre-Ollinger G. et al. Active-impedance control of a lower-limb assistive exoskeleton //2007 IEEE 10th international conference on rehabilitation robotics. IEEE, 2007. P. 188-195. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428426>
7. Anam K., Al-Jumaily A. A. Active exoskeleton control systems: State of the art // Procedia Engineering. 2012. T. 41. P. 988-994. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.273>
8. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) //The International Journal of Robotics Research. 2006. T. 25. № 5-6. P. 561-573. <https://doi.org/10.1177/0278364906065505>
9. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Comparative Analysis of the Industrial Exoskeleton Control Systems // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, Singapore, 2020. P. 63-74. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_6
10. Sheean G. The pathophysiology of spasticity //European journal of neurology. 2002. T. 9. P. 3-9. <https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.2002.0090s1003.x>
11. Stampacchia G. et al. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons //NeuroRehabilitation. 2016. T. 39. No.2. P. 277-283. <https://doi.org/10.3233/NRE-161358>
12. Chernikova L.A. et al. Effect of the use of robotic devices ("Erigo" and "Lokomat") in the early stages after ischemic stroke // Bulletin of rehabilitation medicine. 2008. No.5. P. 73-75.
13. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A.. Simulation of a walking robot-exoskeleton movement on a movable base //ROBOTS IN HUMAN LIFE. P. 15. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.26>
14. Hill A. Mechanics of muscle contraction: Old and new experiences: Transl. from English. Mir, 1972.
15. Heo P. et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering //International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. T. 13. № 5. P. 807-824. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0107-2>

16. Veneman J. F. et al. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation //IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2007. Т. 15. №. 3. P. 379-386. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.903919>
17. Pratt G. A., Williamson M. M. Series elastic actuators //Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. IEEE, 1995. Т. 1. P. 399-406. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.525827>
18. Lu R. et al. Development and learning control of a human limb with a rehabilitation exoskeleton //IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Т. 61. № 7. P. 3776-3785. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148942>
19. Rajasekaran V. et al. An adaptive control strategy for postural stability using a wearable robot //Robotics and Autonomous Systems. 2015. Т. 73. P. 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.11.014>
20. Brahmi B. et al. Adaptive tracking control of an exoskeleton robot with uncertain dynamics based on estimated time-delay control //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2018. Т. 23. №. 2. P. 575-585. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2808235>

References

1. Al-Quraishi M. S. et al. EEG-based control for upper and lower limb exoskeletons and prostheses: A systematic review. *Sensors*, 2018, vol. 18, no.10, pp. 3342. <https://doi.org/10.3390/s18103342>
2. Bhagat N. A. et al. Design and optimization of an EEG-based brain machine interface (BMI) to an upper-limb exoskeleton for stroke survivors. *Frontiers in neuroscience*, 2016, vol. 10, pp. 122. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00122>
3. Kawamoto H. et al. Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller. *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483)*. IEEE, 2003, vol. 2, pp. 1648-1653. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1244649>
4. Rosen J. et al. A myosignal-based powered exoskeleton system. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics-part A: Systems and humans*, 2001, vol. 31, no. 3, pp. 210-222. <https://doi.org/10.1109/3468.925661>
5. Jatsun S., Malchikov A., Loktionova O. Modeling of Human-Machine Interaction in an Industrial Exoskeleton Control System. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, 2020, pp.116-125 https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_12
6. Aguirre-Ollinger G. et al. Active-impedance control of a lower-limb assistive exoskeleton. *2007 IEEE 10th international conference on rehabilitation robotics*. IEEE, 2007, pp. 188-195. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428426>

7. Anam K., Al-Jumaily A. A. Active exoskeleton control systems: State of the art. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 988-994. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.273>
8. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*, 2006, vol. 25, no. 5-6, pp. 561-573. <https://doi.org/10.1177/0278364906065505>
9. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Comparative Analysis of the Industrial Exoskeleton Control Systems. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 63-74. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_6
10. Sheean G. The pathophysiology of spasticity. *European journal of neurology*, 2002, vol. 9, pp. 3-9. <https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.2002.0090s1003.x>
11. Stampacchia G. et al. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons. *NeuroRehabilitation*, 2016, vol. 39, no.2, pp. 277-283. <https://doi.org/10.3233/NRE-161358>
12. Chernikova L.A. et al. Effect of the use of robotic devices ("Erigo" and "Lokomat") in the early stages after ischemic stroke. *Bulletin of rehabilitation medicine*, 2008, no.5, pp. 73-75.
13. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A.. Simulation of a walking robot-exoskeleton movement on a movable base. *ROBOTS IN HUMAN LIFE*. P. 15. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.26>
14. Hill A. Mechanics of muscle contraction: Old and new experiences: Transl. from English - Mir, 1972.
15. Heo P. et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, no. 5, pp. 807-824. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0107-2>
16. Veneman J. F. et al. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007, vol. 15, no. 3, pp. 379-386. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.903919>
17. Pratt G. A., Williamson M. M. Series elastic actuators. *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. IEEE*, 1995, vol. 1, pp. 399-406. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.525827>
18. Lu R. et al. Development and learning control of a human limb with a rehabilitation exoskeleton. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 61, no. 7, pp. 3776-3785. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148942>
19. Rajasekaran V. et al. An adaptive control strategy for postural stability using a wearable robot. *Robotics and Autonomous Systems*. 2015, vol. 73, pp. 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.11.014>

20. Brahmi B. et al. Adaptive tracking control of an exoskeleton robot with uncertain dynamics based on estimated time-delay control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018. vol. 23, no. 2, pp. 575-585. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2808235>

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, Web of Science ResearcherID G-3891-2017

Мальчиков Андрей Васильевич, доцент, старший научный сотрудник, кафедра механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, Web of Science ResearcherID N-8856-2016

Постольный Алексей Александрович, преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: a.postolny@mail.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией НИЛ МИР, кафедра механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ayatsun@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-7295>, Web of Science ResearcherID N-6212-2016

Sergey F. Jatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, Web of Science ResearcherID G-3891-2017

Andrei V. Malchikov, Associate Professor, Senior Researcher of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, Web of Science ResearcherID N-8856-2016

Alexey A. Postolny, Lecturer of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: a.postolny@mail.ru

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Head of Research Laboratory MIR, Associate Professor, Senior Researcher of Department Mechanics of mechatronics and robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ayatsun@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-7295>, Web of Science ResearcherID N-6212-2016

Выбор кинематической структуры модульной робототехнической системы в зависимости от типа поверхности передвижения

А.И. Савельев¹, Д.В. Блинов², А.А. Ерашов¹

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

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская, д. 67, г. Санкт-Петербург 190121, Российская Федерация

✉ e-mail: erashov.a@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования. Цель настоящей работы заключается в выявлении преимуществ и недостатков различных кинематических структур (формаций) самореконфигурируемых модульных робототехнических систем в зависимости от типа поверхности, по которой в основном должна перемещаться данная система.

Методы. В работе проведен анализ кинематических структур модульных робототехнических систем относительно их возможностей перемещения, выделены особенности перемещения данных формаций по различным поверхностям, а также особенности применения некоторых формаций. Проведено исследование функциональных возможностей собственной мобильной автономной реконфигурируемой системы на основе рассмотренных формаций.

Результаты. По результатам проведенного исследования были выделены основные структуры модульных робототехнических систем, среди которых наиболее популярными на сегодняшний день являются формации, имеющие цепную архитектуру: «змея», «манипулятор»; «шагающие» структуры: «квадропод», «паук», «сороконожка», а также мобильные структуры «машина», «колесо» и «шар». На основе проведенного анализа были разработаны структуры для собственной модульной робототехнической системы. При разработке структур были учтены геометрические особенности и кинематические ограничения ее модулей.

Заключение. Применение результатов анализа позволит лучше адаптировать модульную самореконфигурируемую робототехническую систему к поверхности, по которой перемещается данная система. На выбор той или иной формации модульной системы также оказывает влияние необходимая скорость перемещения по данной поверхности. Наибольшей адаптивностью к различным типам поверхностей обладают шагающие формации, однако они же являются наиболее сложными с точки зрения разработки системы управления.

Ключевые слова: модульная робототехника; модульные робототехнические системы; самореконфигурируемые модульные роботы; автономные роботы; кинематические структуры модульных роботов; реконфигурация.

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

Финансирование: работа выполнена при поддержке РФФИ № 20-08-01109_А.

Для цитирования: Савельев А.И., Блинов Д.В., Ерашов А.А. Выбор кинематической структуры модульной робототехнической системы в зависимости от типа поверхности передвижения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 120-135. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-120-135>.

Поступила в редакцию 24.08.2021

Подписана в печать 30.09.2021

Опубликована 21.10.2021

Choice of Kinematic Structure of Modular Robotic System Depending on the Type of Motion Surface

Anton I. Saveliev¹, Dmitriy V. Blinov², Aleksei A. Erashov¹

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

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Bolshaya Morskaya 67, St. Petersburg 190121, Russian Federation

✉ e-mail: erashov.a@iiias.spb.su

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to identify the advantages and disadvantages of various kinematic structures (formations) of self-reconfigurable modular robotic systems depending on the type of surface over which the system is mainly to be moved.

Methods. Analysis of kinematic structures of modular robotic systems with respect to their displacement capabilities was carried out. Features of movement of these formations on different surfaces, as well as features of application of some formations are highlighted. A study of functionality of its own mobile autonomous reconfigurable system was carried out on the basis of described formations.

Results. According to the results of the study, the main structures of modular robotic systems were identified, among which the most popular are formations that have a chain architecture: "snake," "manipulator"; "walking" structures: "quadropod," "spider," "centipede," as well as mobile structures "machine," "wheel" and "ball." Based on the conducted analysis, structures were developed for their own modular robotics system. Geometric features and kinematic limitations of its modules were considered in developing the structures

Conclusion. The use of the analysis results will allow better adaptation of a modular self-reconfigurable robotic system to the surface on which this system moves. The selection of a particular formation of the modular system is also influenced by the required speed of movement over a given surface. Walking formations have the greatest adaptability to various types of surfaces, but they are also the most difficult from the point of view of control system developing.

Keywords: modular robotics; modular robotic systems; self-reconfigurable modular robots; autonomous robots; kinematic structures of modular robots; reconfiguration.

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

Funding: The work was carried out with the support of RFPI No. 20-08-01109_A.

For citation: Saveliev A. I., Blinov D.V., Erashov A. A. Choice of Kinematic Structure of Modular Robotic System Depending on the Type of Motion Surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 120-135 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-120-135>.

Received 24.08.2021

Accepted 30.09.2021

Published 21.10.2021

Введение

Модульные робототехнические системы [1] имеют три основных преимущества перед классическими роботами: адаптивность [2], повышенная ремонтпригодность [3] и более низкая стоимость производства [4]. Снижение стоимости производства по сравнению с классическими роботами обеспечивает отсутствие необходимости вносить корректировки в производственный процесс при изменении назначения роботов [5].

На выбор конкретной формации модульных роботов в каждом отдельном случае применения влияют выполняемые задачи и условия функционирования. Вместе с тем различные кинематические структуры могут выполнять одни и те же задачи с разной степенью эффективности. Актуальной темой исследований является выбор формаций модульных робототехнических систем в зависимости от условий среды и задач. Выбор подходящей структуры позволит повысить точность работы системы, уменьшить энергетические потери, а также оптимизировать маршрут при выборе мобильных формаций.

В данной работе рассмотрены популярные кинематические структуры модульных роботов и приведен их анализ для выбора наиболее подходящих формаций с учетом выполняемых задач и физических ограничений рабочей области. Результаты проведенного анализа рассматриваются применительно к соб-

ственной мобильной автономной реконфигурируемой системе [6].

Материалы и методы

В современной модульной робототехнике выделяют три основные архитектуры роботов [5]: змеевидную (Chain architecture), решетчатую (Lattice architecture) и гибридную (Hybrid architecture). При змеевидной архитектуре модули формируют цепочку или древовидную структуру, при этом число присоединенных роботов может варьироваться. При решетчатой архитектуре модули занимают фиксированное положение и образуют двумерные или трехмерные структуры в виде сеток различного типа. Гибридная архитектура совмещает эти два паттерна [5, 7].

Наиболее распространенной формацией модульной робототехнической системы является «змея». Роботы данной формации состоят из последовательно соединенных модулей. Передвижение робота такой формации происходит за счет встроенных в модули приводов. Популярность формации «змея» обусловлена способностью робота перемещаться в узких, труднопроходимых местах, подниматься на небольшие уступы, преодолевать ямы и траншеи, что невозможно при использовании каждого модуля отдельно. Одним из примеров формации «змея» является робототехническая система Swarm-bot [8, 9]. Каждый модуль Swarm-bot имеет мани-

пулятор для взаимодействия с окружающей средой и гусенично-колесную платформу для движения. Swarm-bot имеет только один захват для взаимодействия с другими модулями, что не позволяет ей образовывать сложные пространственные структуры. Этого недостатка лишены серийные модульные роботы SMORES-EP [10, 11]. Каждый модуль приводится в движение исполнительным механизмом с двигателем постоянного тока, модули соединяются между собой посредством постоянных магнитов [12]. Данные конфигурации обеспечивают подъем по лестницам, преодоление преград различной высоты, передвижение в узких пространствах и транспортировку малогабаритных грузов.

Из формации типа «змея» возможно образование других конфигураций [13] за счет присоединения модулей к уже функционирующей структуре. Змеевидные роботы менее эффективны по сравнению с другими формациями при движении по гладкой поверхности. В первую очередь это связано с тем, что максимальная скорость данной системы ограничена максимальной скоростью отдельного модуля. Кроме того, данная формация является маломобильной, что затрудняет выполнение маневров, а также передвижение робота по неровной поверхности. Особенностью данной формации является большое число подвижных сочленений (в некоторых случаях их может быть больше 10).

Близкую к «змее» геометрию имеет формация «манипулятор». Основная задача роботов, имеющих такую формацию, состоит в перемещении объектов. Зачастую формация «манипулятор» относится к змеевидной архитектуре, однако встречаются и гибридные варианты. При змеевидной архитектуре «манипулятора» модули последовательно соединяются друг с другом, при этом один из концов системы фиксируется, а на другом устанавливается специальный модуль, обеспечивающий взаимодействие с объектами в рабочем пространстве. При гибридной архитектуре система использует для опоры специальное основание, при этом несколько модулей используется в качестве противовеса для фиксации системы в заданном положении. Пример робота с формацией «манипулятор» на основе модулей Larva-bot представлен в [14]. Движение звеньев манипулятора, собранного из модулей Larvabot, осуществляется при помощи сервоприводов, а для соединения используются механические крючки.

Недостатков формации «змея», связанных с движением по неровной поверхности, лишена формация «машина», которая относится к решетчатой архитектуре. При движении мобильный робот с формацией «машина» соприкасается с поверхностью несколькими элементами, которые выполняют роль колес. В качестве таких элементов могут выступать стандартные модули робототехнической системы, способные к

передвижению, или специальные модули, если такой возможности у стандартных модулей нет. Примерами модульной робототехнической системы, способной перестраиваться в формацию «машина», являются ранее упомянутый SMORES-EP и Soldercubes [15]. Soldercubes использует для построения данной формации девять модулей, из которых четыре являются специализированными модулями-колесами. Формация «машина» позволяет робототехнической системе перемещаться с высокой скоростью по поверхностям с неровностями (небольшим ямам и буграм), поворачивать на высокой скорости, а также в некоторых случаях перевозить грузы. Однако роботы с формацией «машина» не способны преодолевать такие препятствия, как лестницы, глубокие ямы и т.д. Кинематическая схема данной формации представляет собой некоторое статичное основание с подвижными элементами «колесами», каждый из которых имеет в среднем по 2 степени свободы.

Наряду с вышеупомянутыми формациями модульных роботов популярны «шагающие» формации: «квадропад» (quadruped), «паук», «сороконожка», относящиеся к решетчатой архитектуре. Шагающие модульные роботы включают в себя модули-конечности, закрепленные на модуле-основании (теле). Так, для демонстрации возможностей модульной робототехнической системы Fable II [16], была использована шагающая формация с четырьмя ко-

нечностями «квадропад». Модульная робототехническая система Hexamob [17] представляет другой вариант шагающей формации – насекомоподобные структуры с 12 конечностями «сороконожка», для создания которой было использовано пятнадцать идентичных модулей. Шагающие системы наиболее универсальны, поскольку способны преодолевать различные препятствия. Также важным достоинством большинства шагающих формаций является наличие основания, которое можно использовать для переноса грузов. Недостатком данной формации является сложность создания системы управления и ограниченные функциональные возможности. Кроме того, такая формация отличается достаточно низкой скоростью передвижения, поэтому шагающие роботы наиболее эффективны в случаях, когда использование других формаций затруднительно или невозможно.

Отдельно стоит упомянуть перекачивающихся (rolling) модульных роботов, которые имеют змеевидную или решетчатую архитектуру и образуют кольцо или сферу. Передвижение данной структуры происходит посредством смещения центра тяжести [18, 19]. Достоинствами формаций «колесо» и «сфера» является возможность развивать большую скорость перемещения по сравнению с остальными формациями. Также данные формации приспособлены для передвижения по пересеченной местности, однако в связи с частыми столкновениями с поверхностью

требуют дополнительных средств защиты конструкции от повреждений. Кроме того, такие формации не предназначены для движения по узким проходам, поэтому наиболее предпочтительным является использование их на открытой местности.

При передвижении мобильных робототехнических формаций важную роль играет поверхность, по которой предстоит перемещаться роботу. Существует множество методов классификации поверхностей, но для модульных робототехнических систем актуальной является классификация по степени дисперсности поверхности: гладкие (бетон, металлические пластины), крупнодисперсные (булыжник, гравий), среднедисперсные (асфальт) и мелкодисперсные (песок, земля, трава) [20] и наличию у поверхности углов наклона (горизонтальные, наклонные и поверхности с переменным углом наклона) [21]. Наиболее адаптируемыми к типу поверхности формациями являются «шагающие» формации: «квадропод», «паук», «сороконожка». Однако скорость передвижения при использовании данных формаций является низкой. Поэтому в случае необходимости движения работа по ровной поверхности с большой скоростью следует использовать формацию «машина», а также формации «колесо» и «сфера». Если же робототехнической системе необходимо преодолевать труднопроходимый участок местности (труба, узкая траншея, широкая яма), лучшим вариантом будет

использование формации «змея». Для обеспечения взаимодействия со средой необходимо использовать формацию «манипулятор».

Результаты и их обсуждение

Среди рассмотренных модульных робототехнических систем присутствуют такие, которые могут формировать различные кинематические структуры, т.е. такие системы имеют возможность адаптироваться под тип поверхности, по которым они перемещаются. Однако ни в одной из работ не была продемонстрирована возможность образования всех распространенных кинематических структур, рассмотренных в настоящей работе. Для исследования практического применения многофункциональных модульных робототехнических систем необходимо выбрать такую, которая позволит сформировать вышеописанные формации. Адаптацией к типам поверхностей обладают модули мобильной автономной реконфигурируемой системы (МАРС) [6, 22]. МАРС способна самостоятельно соединяться в формацию вне зависимости от начального расположения устройств, а также перемещаться в ее составе [1].

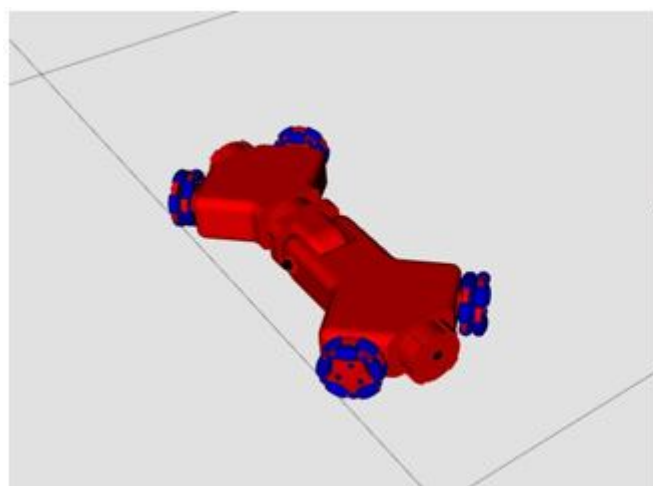
Отдельный модуль МАРС (рис. 1а) включает в себя колесную базу на все-направленных колесах и два вращательных сочленения, расположенных в середине модуля. Визуализация модели одного модуля и его структурная кинематическая схема представлены на рис. 1. Единичный модуль данной системы со-

стоит из двух вращательных сочленений, с которыми связаны системы отсчета $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$. При этом диапазон вращения первого сочленения составляет $-90 < \theta_1 < 90$, а второго $-180 < \theta_2 < 180$. Также в данной модели важным элементом являются колеса, поскольку благодаря им происходит контакт с поверхностью. С ними связаны системы отсчета $X_3Y_3Z_3 - X_6Y_6Z_6$ (рис. 1б).

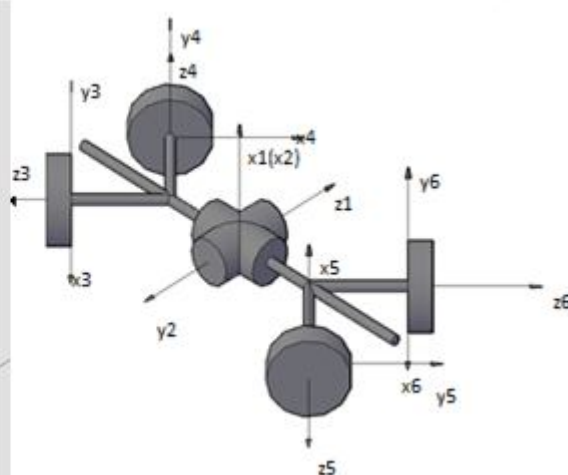
Рассмотрим кинематические структуры, которые можно получить с помощью МАРС. Для визуализации всех формаций был использован пакет RViz операционной системы Robot Operating System. Поскольку модули МАРС имеют собственную колесную базу, для формирования структуры «машина» можно отказаться от специальных модулей, выполняющих роль колес, и использовать колеса соединенных модулей. В таком случае модульная робототехническая система МАРС состоит из

трех модулей, два из которых используют свои боковые колеса для движения, а третий соединяет их и приподнимает центральную часть формации в тех ситуациях, когда необходимо обеспечить повышенную проходимость (рис. 2а). Данная формация состоит из шести вращательных сочленений и четырех колес (рис. 2б).

На рис. 3а продемонстрирована формация «змея», состоящая из 10 модулей МАРС. Для передвижения данной формации используется колесная база модулей, а для маневрирования и преодоления препятствий – их подвижные сочленения, число которых составляет $2 \cdot n$, где n – число последовательно соединенных модулей. Рассмотренная модель имеет 40 колес и 20 подвижных сочленений. Структурная кинематическая схема данной формации представлена на рис. 3б.



а)



б)

Рис. 1. Отдельный модуль МАРС: **а** – модель; **б** – структурная кинематическая схема

Fig. 1. One module of MARS: **a** – model; **b** – structural kinematic diagram

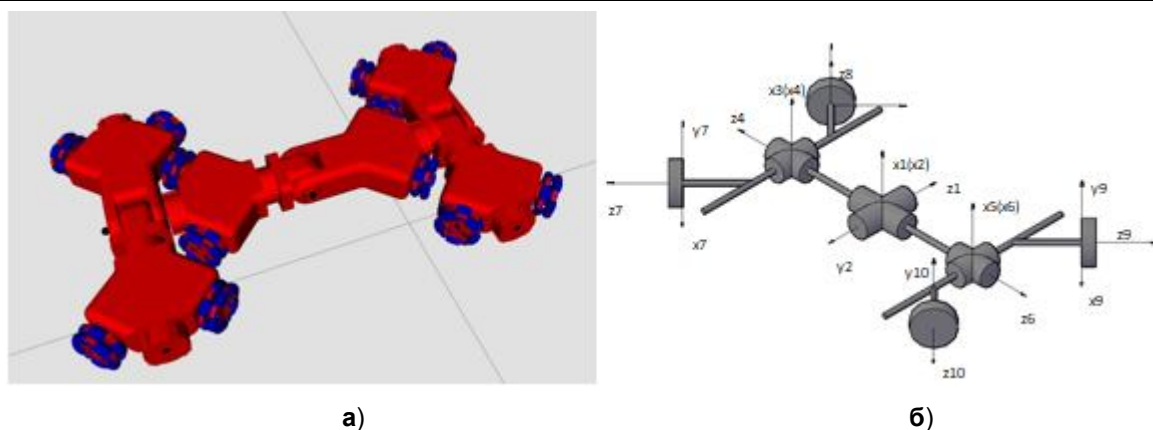


Рис. 2. Формация «машина» модульной робототехнической системы MAPC: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

Fig. 2. "Machine" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

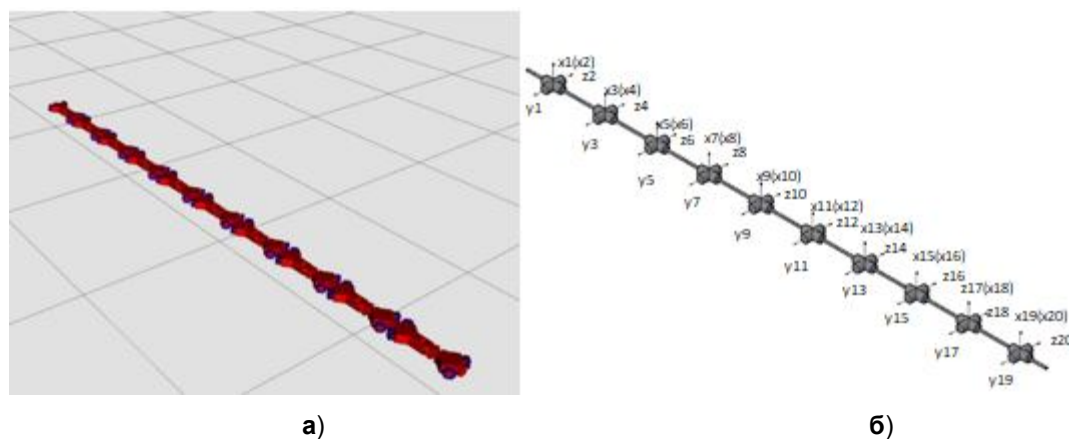


Рис. 3. Формация «змея» модульной робототехнической системы MAPC: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

Fig. 3. "Snake" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

Формация «змея», не разделяясь, может перестроиться в формацию «манипулятор». Формация «манипулятор» MAPC представляет собой цепную структуру, закрепленную на неподвижном основании, составленном из других модулей. Число сочленений такой формации составляет $2 \cdot n$, где n – число последовательно соединенных модулей подвижной части. На рис. 4а представлена формация «манипулятор» модульной робототехнической системы MAPC с 8

подвижными сочленениями. Структурная кинематическая схема данной формации представлена на рис. 4б.

Также, добавив дополнительную связь между концом и началом формации «змея», состоящей из 10 модулей, можно получить мобильную «перекачивающуюся» формацию «колесо» (рис. 5а). В таком случае данная структура будет иметь 20 подвижных сочленений и состоять из 10 модулей (рис. 5б).

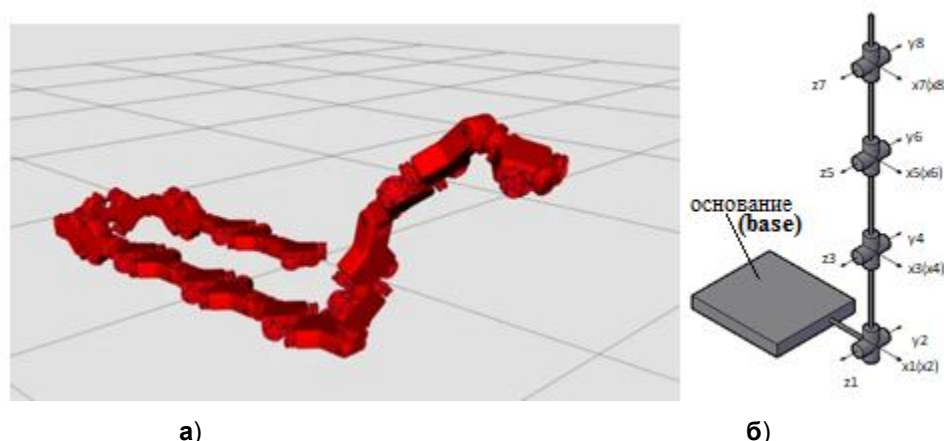


Рис. 4. Формация «манипулятор» модульной робототехнической системы МАРС:
а – визуализация; б – структурная кинематическая схема

Fig. 4. "Manipulator" formation of a modular robotic system MARS: а – visualization; б – structural kinematic diagram

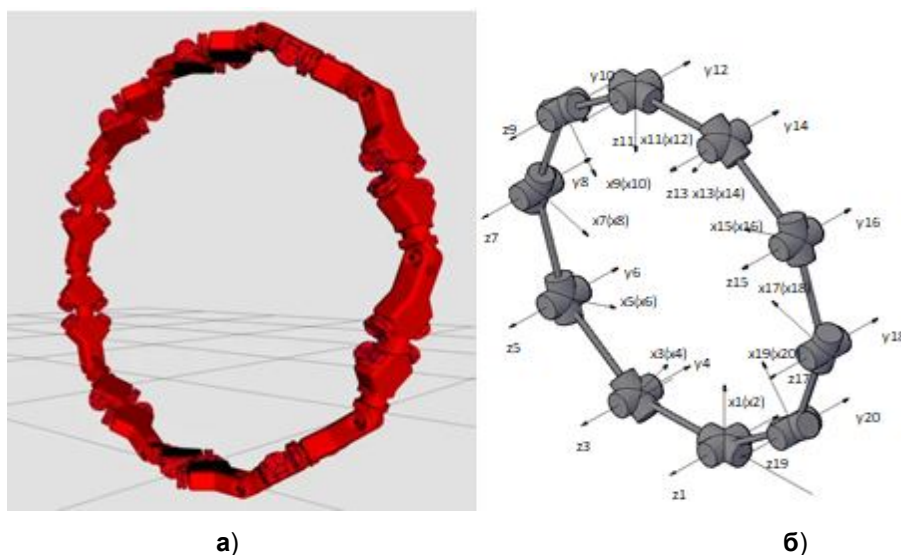


Рис. 5. Формация «колесо» модульной робототехнической системы МАРС: а – визуализация;
б – структурная кинематическая схема

Fig. 5. "Wheel" formation of a modular robotic system MARS: а – visualization; б – structural kinematic diagram

Наиболее сложной структурой модульной робототехнической системы МАРС является формация «квадропад». Она состоит из основания и четырех подвижных конечностей (ног), имеет решетчатую архитектуру и формируется из десяти модулей (рис. 6а). Каждая конечность состоит из двух модулей с четырьмя подвижными сочленениями.

Важным элементом данной схемы являются «ступни». Благодаря им происходит взаимодействие между робототехнической системой и окружающей средой, поэтому вводятся дополнительные системы отсчета: $X_5Y_5Z_5$, $X_{10}Y_{10}Z_{10}$, $X_{15}Y_{15}Z_{15}$ и $X_{20}Y_{20}Z_{20}$ (рис. 6б), которые связаны с окончанием каждой конечности.

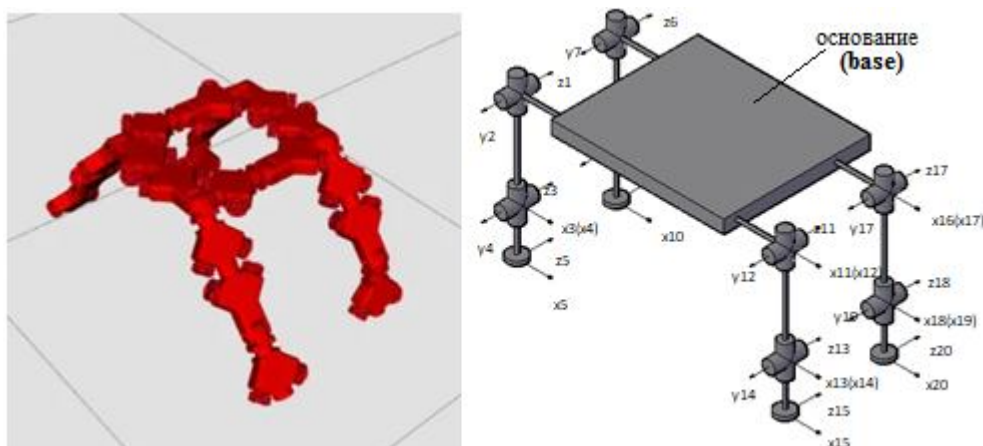


Рис. 6. Формация «паук» модульной робототехнической системы МАРС: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

Fig. 6. "Spider" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

Сравнение структур, образуемых МАРС, с рассмотренными аналогами приведено в табл. 1. Символом «+» отмечена возможность образования определенной кинематической структуры дан-

ной модульной робототехнической системой, а символом «-» – данная модульная система не имеет возможности образовать конкретную формацию.

Таблица 1. Сравнение возможностей образования формация различных модульных робототехнических систем

Table 1. Comparison of Formation Possibilities of Various Modular Robotic Systems

Формации / Formation Модульная система / Modular system	«Машина» / «Ma- chine»	«Змея» / «Snake»	«Манипулятор» / «Manipulator»	«Колесо», «сфера» / «Wheel», «orb»	«Квадропод», «паук», «сороко- ножка» / «Quad- ropod», «spider», «centipede»
Swarm-bot [9]	-	+	+	-	-
SMORES-EP [10]	+	+	+	+	+
Larva-bot [14]	-	-	+	-	+
Soldercubes [15]	+	+	+	-	+
Fable [16]	-	+	+	-	+
Hexamob [17]	-	+	+	+	+
CKBOT [18]	-	+	-	+	-
Novel modular rolling robot [19]	-	-	-	+	-
MARS [6]	+	+	+	+	+

Основной особенностью модульной робототехнической системы МАРС является наличие у данной системы все-направленных колес. Это делает возможным перемещение по мелкодисперсным поверхностям формаций, которые для передвижения используют колеса модулей. Также следует выделить формацию «машина». В данной формации за счет возможности перевозить грузы была существенно повышена маневренность. Формация «квадропод», которую могут образовать модули МАРС, является наиболее адаптируемой к различным типам поверхностей, затем за ней по степени адаптации к поверхности следуют формации «змея», «колесо», «машина». При этом стоит заметить, что шагающие формации имеют меньшую скорость передвижения по горизонтальным поверхностям по сравнению с формацией «машина». Также можно отметить, что формация «колесо» для передвижения и удержания равновесия требует управления всеми модулями, что усложняет систему управления, в то время как для перемещения формаций «машина», «змея» и «квадропод» требуется управлять сравнительно меньшим количеством модулей. Перемещение формации «манипулятор» возможно с помощью реконфигурации в, например, формацию «змея» или «квадропод» через промежуточные формации, при необходимости отключая или подключая модули. МАРС поддерживает возможность автономного расформирования текущей структуры и автономной сборки модулей, составляя различные формации.

Выводы

В настоящей работе были рассмотрены наиболее часто используемые структуры модульных робототехнических систем. Наиболее адаптируемыми из них являются шагающие формации: «квадропод», «паук» и «сороконожка». Использование данных формаций сопровождается относительно низкой скоростью перемещения по сравнению с такими формациями, как «колесо», «машина» и «сфера», которые достигают на ровной поверхности больших скоростей. Для достаточно ограниченного рабочего пространства и поверхностей с переменными углами наклона (лестницы, узкие траншеи, трубы и шахты), а также пространств с перепадом высот (широкие ямы), наиболее подходящей структурой будет «змея». Подвид данной формации, «манипулятор», возможно также использовать для взаимодействия с объектами в рабочем пространстве. Исследование возможностей модульной робототехнической системы МАРС показало, что данная система обладает достаточной геометрией, чтобы с помощью ее модулей можно было реализовать все рассмотренные кинематические структуры модульных робототехнических систем. Кинематическая структура рассматриваемой системы способна изменяться в зависимости от типа поверхности передвижения, что обеспечивается способностью к самореконфигурации. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку системы управления для самореконфигурируемых роботов типа МАРС для решения задач кинематики, динамики и обеспечения плавности движения.

Список литературы

1. Formation of modular structures with mobile autonomous reconfigurable system / N. Pavliuk, A. Saveliev, E. Cherskikh, D. Pykhov // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, Singapore, 2020. 3. 383-395. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_31.
2. Roombots extended: Challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture / S. Hauser, M. Mutlu, P. A. Léziart, H. Khodr, A. Bernardino, A. J. Ijspeert // Robotics and Autonomous Systems. 2020. Vol. 127. C. 103467. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103467>.
3. Current trends in reconfigurable modular robots design / A. Brunete, A. Ranganath, S. Segovia, J. P. de Frutos, M. Hernando, E. Gambao // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14. № 3. P. 1729881417710457. <https://doi.org/10.1177/1729881417710457>.
4. Self-reconfiguring modular robot learning for lower-cost space applications / A. B. Jones, T. Cameron, B. Eichholz, D. Loegering, T. Kray, J. Straub // 2019 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2019. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742133>.
5. Modular Self-Reconfigurable Robots / M. Yim, P. J. White, M. Park, J. Sastra // 2009.
6. Pavliuk N. A., Krestovnikov K. D., Pykhov D. E. Mobile autonomous reconfigurable system // Problemele energeticii regionale. 2018. Vol. 1. C. 125-135. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217296>.
7. Chennareddy S., Agrawal A., Karuppiyah A. Modular self-reconfigurable robotic systems: a survey on hardware architectures // Journal of Robotics. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5013532>.
8. Dorigo M. et al. The swarm-bots project // International Workshop on Swarm Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. P. 31-44. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_4.
9. Mondada F. et al. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2005. Vol. 12. №. 2. P. 21-28. <https://doi.org/10.1109/MRA.2005.1458313>.
10. Davey J., Kwok N., Yim M. Emulating self-reconfigurable robots-design of the SMORES system // 2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE, 2012. P. 4464-4469. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385845>.
11. Design and characterization of the ep-face connector / T. Tosun, J. Davey, C. Liu, M. Yim // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016. P. 45-51. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759033>.

12. An integrated system for perception-driven autonomy with modular robots / J. Daudelin, G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit, M. Campbell // *Science Robotics*. 2018. Vol. 3. №. 23. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat4983>.
13. An End-To-End System for Accomplishing Tasks with Modular Robots / G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit // *Robotics: Science and systems*. 2016. Vol. 2. P. 7.
14. The kinematics analysis of a novel self-reconfigurable modular robot based on screw theory / Y. Li, S. Zhu, Z. Wang, L. Zhang, X. Ma, Z. Cui // *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 2016. №. mime. <https://doi.org/10.12783/dtetr/mime2016/10196>.
15. Accomplishing high-level tasks with modular robots / G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit // *Autonomous Robots*. 2018. Vol. 42. №. 7. P. 1337-1354. <https://doi.org/10.1007/s10514-018-9738-1>.
16. Fable II: Design of a modular robot for creative learning / M. Pacheco, R. Fogh, H. H. Lund, D. J. Christensen // *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2015. P. 6134-6139. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140060>.
17. Patlolla S., Agrawal A., KR, A. HexaMob—a hybrid modular robotic design for implementing biomimetic structures // *Robotics*. 2017. Vol. 6. №. 4. P. 27. <https://doi.org/10.3390/robotics6040027>.
18. Sastra J., Chitta S., Yim M. Dynamic rolling for a modular loop robot // *The International Journal of Robotics Research*. 2009. Vol. 28. №. 6. P. 758-773. <https://doi.org/10.1177/0278364908099463>.
19. Wei X., Tian Y., Wen S. Design and locomotion analysis of a novel modular rolling robot // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 133. P. 23-43. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.004>.
20. Yuan Q., Wang J. Design and Experiment of the NAO Humanoid Robot's Plantar Tactile Sensor for Surface Classification // *2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. IEEE, 2017. P. 931-935. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.197>.
21. Rubtsova J. Approach to Image-Based Segmentation of Complex Surfaces Using Machine Learning Tools During Motion of Mobile Robots // *Electromechanics and Robotics*. Springer, Singapore, 2022. P. 191-200. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_17.
22. Connecting gripping mechanism based on iris diaphragm for modular autonomous robots / N. Pavliuk, P. Smirnov, A. Kondratkov, A. Ronzhin // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2019. P. 260-269. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_25.

References

1. Pavliuk N., Saveliev A., Cherskikh E., Pykhov D. Formation of modular structures with mobile autonomous reconfigurable system. *In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020; Springer, Singapore, pp. 383-395. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_31.
2. Hauser S., Mutlu M., Léziart P. A., Khodr H., Bernardino A., Ijspeert A. J. Roombots extended: Challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture. *Robotics and Autonomous Systems*. 2020; 127: 103467. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103467>.
3. Brunete A., Ranganath A., Segovia S., de Frutos J. P., Hernando, M., Gambao, E. Current trends in reconfigurable modular robots design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017; 14(3): 1729881417710457. <https://doi.org/10.1177/1729881417710457>.
4. Jones A. B., Cameron T., Eichholz B., Loegering D., Kray T., Straub J. Self-reconfiguring modular robot learning for lower-cost space applications. *In 2019 IEEE Aerospace Conference*. 2019; pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742133>.
5. Yim M., White P. J., Park M., Sastra J. Modular Self-Reconfigurable Robots. 2009.
6. Pavliuk N. A., Krestovnikov K. D., Pykhov D. E. Mobile autonomous reconfigurable system. *Problemele energeticii regionale*. 2018; 1: 125-135. DOI: 10.5281/zenodo.1217296.
7. Chennareddy S., Agrawal A., Karuppiiah A. Modular self-reconfigurable robotic systems: a survey on hardware architectures. *Journal of Robotics*, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/5013532>.
8. Dorigo M., Tuci E., Groß R., Trianni V., Labella T. H., Nouyan S., ... Gambardella, L. M. The swarm-bots project. *In International Workshop on Swarm Robotics*. 2004; Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 31-44. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_4.
9. Mondada F., Gambardella L. M., Floreano D., Nolfi S., Deneuborg J. L., Dorigo M. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2005; 12(2): 21-28. <https://doi.org/10.1109/MRA.2005.1458313>.
10. Davey J., Kwok N., Yim M. Emulating self-reconfigurable robots-design of the SMORES system. *In 2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. 2012; IEEE, pp. 4464-4469. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385845>.
11. Tosun T., Davey J., Liu C., Yim M. Design and characterization of the ep-face connector. *In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016; IEEE, pp. 45-51. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759033>.

12. Daudelin J., Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H., Campbell M. An integrated system for perception-driven autonomy with modular robots. *Science Robotics*. 2018; 3(23). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat4983>.
13. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. An End-To-End System for Accomplishing Tasks with Modular Robots. *In Robotics: Science and systems*. 2016; 2: p. 7.
14. Li Y., Zhu S., Wang Z., Zhang L., Ma X., Cui Z. The kinematics analysis of a novel self-reconfigurable modular robot based on screw theory. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 2016. DOI: 10.12783/dtetr/mime2016/10196.
15. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. Accomplishing high-level tasks with modular robots. *Autonomous Robots*. 2018; 42(7): 1337-1354. <https://doi.org/10.1007/s10514-018-9738-1>.
16. Pacheco M., Fogh R., Lund H. H., Christensen D. J. Fable II: Design of a modular robot for creative learning. *In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015; IEEE, pp. 6134-6139. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140060>.
17. Patlolla S., Agrawal A., KR A. HexaMob—a hybrid modular robotic design for implementing biomimetic structures. *Robotics*. 2017; 6(4): 27. <https://doi.org/10.3390/robotics6040027>.
18. Sastra J., Chitta S., Yim M. Dynamic rolling for a modular loop robot. *The International Journal of Robotics Research*. 2009; 28(6): 758-773. <https://doi.org/10.1177/0278364908099463>.
19. Wei X., Tian Y., Wen S. Design and locomotion analysis of a novel modular rolling robot. *Mechanism and Machine Theory*. 2019; 133: 23-43. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.004>.
20. Yuan Q., Wang J. Design and Experiment of the NAO Humanoid Robot's Plantar Tactile Sensor for Surface Classification. *In 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. 2017; IEEE, pp. 931-935. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.197>.
21. Rubtsova J. Approach to Image-Based Segmentation of Complex Surfaces Using Machine Learning Tools During Motion of Mobile Robots. *In Electromechanics and Robotics*. 2022; Springer, Singapore, pp. 191-200. (in Press). https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_17.
22. Pavliuk N., Smirnov P., Kondratkov A., Ronzhin A. Connecting gripping mechanism based on iris diaphragm for modular autonomous robots. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2019; Springer, Cham, pp. 260-269. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_25.

Информация об авторах / Information about the Authors

Савельев Антон Игоревич, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: saveliev@iias.spb.su

Anton I. Saveliev, Senior Researcher and Head of Laboratory of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Russian Federation, e-mail: saveliev@iias.spb.su

Блинов Дмитрий Владимирович, магистр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: d99b09@yandex.ru

Dmitriy V. Blinov, Master Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: d99b09@yandex.ru

Ерашов Алексей Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: erashov.a@iias.spb.su

Aleksei A. Erashov, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: erashov.a@iias.spb.su

Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры

А. Б. Клименко¹ ✉

¹ НИИ многопроцессорных вычислительных систем им. Академика Каляева Южного федерального университета, ул. Чехова, д. 2, г. Таганрог 347928, Российская Федерация

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является подбор метода управления распределенной системой, который бы, на основании известных параметров, позволил уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств. Под ресурсом информационной системы понимается вероятность безотказной работы (ВБР), которая снижается с течением времени для каждого узла, тем быстрее, чем выше его загруженность.

Методы. Учитывая, что при высокой динамике краевого слоя сети частота реконфигураций системы становится относительно высокой, а необходимость реконфигураций непредсказуема, снижение общего времени, затрачиваемого на реконфигурации, позволяет увеличить время, затрачиваемое на решение функциональных вычислительных задач системы и тем самым снизить загруженность узлов. Время реконфигурации может быть уменьшено как за счет уменьшения времени детекции отказа в распределенной системе, так и за счет уменьшения времени поиска новой конфигурации. В данной работе рассмотрен способ снижения времени детекции отказов. Анализ применимости методов управления системой (централизованный, с распределенным лидером, децентрализованный) производится на основе полученных аналитических оценок времени детекции системой отказа в условиях управления посредством того или иного метода. Численный эксперимент позволяет выделить области параметров систем, где предпочтительно использование метода с распределенным лидером.

Результаты. Основным результатом данной работы является методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры, ориентированная на уменьшения расхода ресурсов вычислительных устройств.

Заключение. Время реконфигурации системы может быть сокращено за счет выбора наиболее подходящего метода управления. Таким образом увеличивается время, отводимое на решение функциональных задач приложения, снижается загруженность вычислительных узлов и, следовательно, повышаются значения ВБР на протяжении горизонта планирования.

Ключевые слова: краевые вычисления; надежность; распределенные системы; реконфигурация; управление информационными системами; децентрализованное управление; распределенный лидер.

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

Финансирование: работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-29-03229 и 18-29-22093.

Для цитирования: Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 136-151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>.

Поступила в редакцию 20.07.2021

Подписана в печать 12.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Choosing Methodology of How to Manage Distributed Information Systems under Conditions of High Dynamics of Network Infrastructure

Anna B. Klimenko ¹ ✉

¹ Scientific research institute of multiprocessor computer systems of Southern Federal University
2 Chekhov str., Taganrog 347928, Russian Federation

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. is to identify a distributed system control method that, based on known parameters, would reduce the resource consumption of computing devices. An information system resource is probability of failure-free operation (FFO), which decreases over time for each node, the faster the higher its load.

Methods. Frequency of system reconfiguration becomes relatively high with high dynamics of edge layer of a network and the need for reconfiguration is unpredictable. Reducing the total time spent on reconfiguration allows to increase time spent on solving functional computing tasks of the system and thereby reducing nodes load. Reconfiguration time can be reduced both by reducing failure detection time in distributed system and by reducing searching time for new configuration. A method for reducing failure detection time is described. The applicability analysis of system management methods (centralized, distributed leader, decentralized) is carried out on the basis of obtained analytical evaluations of failure detection time by the system in control conditions through one or another method. A numerical experiment allows to distinguish areas of system parameters, where it is preferable to use the method with a distinguished leader.

Results. The main result of this work is a method of choosing how to manage distributed information systems in conditions of high dynamics of network infrastructure, focused on reducing of resource consumption in computing devices.

Conclusion. The system reconfiguration time could be reduced by selecting the most appropriate control method. In this case, the time for solving functional tasks of application is increased, the workload of computing nodes is reduced, and therefore FFO values are increased over the planning horizon.

Keywords: edge calculations; reliability; distributed systems; reconfiguration; management of information systems; decentralized management; distributed leader.

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

Funding: the work was carried out with the support of RFFI grants No. 18-29-03229 and 18-29-22093.

For citation: Bondar O. G., Brezhneva E. O., Andreev K. G., Polyakov N. V. Choosing methodology of how to manage distributed information systems under conditions of high dynamics of network infrastructure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 136-151 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>.

Received 20.07.2021

Accepted 12.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

В настоящее время происходит интенсивное расширение круга информационных систем, использующих туманный и краевые слои сети для решения функциональных задач. Такая тенденция, прежде всего, связана с возрастанием объемов обрабатываемой информации, что приводит к недостаточности облачных сервисов как в смысле нагрузки на сеть при передаче данных в облако, так и в смысле латентности систем, возникающей вследствие необходимости передачи данных через многочисленные промежуточные узлы сети.

Однако туманный и краевой слои сети обладают высокой динамикой, то есть топология сети, узла, ее составляющие и связи между ними могут меняться практически непредсказуемо в зависимости от целей и задач владельцев узлов. Такая динамика внешних слоев сети приводит к множественным реконфигурациям систем, что, в свою очередь, может негативно сказываться на качестве предоставляемых сервисов (QoS), а также на загруженности устройств в случае, когда функциональные задачи должны решаться в строго отведенное для этого время [1-7].

Проблеме минимизации времени реконфигураций для информационных систем, функционирующих на краю сети в настоящее время посвящен достаточно широкий круг работ, например [8-10]. Однако известные и находящиеся в открытом доступе работы рассмат-

ривают минимизацию времени на реконфигурацию с точки зрения повышения QoS. В данной статье проблема уменьшения времени реконфигурации будет рассмотрена с точки зрения остаточного ресурса вычислительных устройств.

Остаточный ресурс вычислительного устройства оценивается значением вероятности безотказной работы (ВБР) этого устройства [11]. В данной работе показано, каким образом остаточный ресурс связан со временем, отводимым для реконфигураций, и каким образом снижение временных затрат позитивно сказывается на ВБР устройства.

Целью данного исследования является подбор метода управления распределенной системой, который бы, на основании известных параметров, позволил уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств.

Как результат исследования, в работе предложена методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры, сокращающая время детекции отказа в системе и тем самым предоставляющая дополнительное время для выполнения системой функциональных задач.

Материалы и методы

Реконфигурации систем в туманном и краевом слое сети и ВБР устройств

Проблема необходимости частых реконфигураций в динамических слоях се-

ти является актуальной и рассматривается в работах [1-3]. Однако, учитывая тот факт, что не удалось обнаружить работы, в которых бы проблема была рассмотрена на примерах конкретных функционирующих систем с перечислением актуальных параметров сетевой инфраструктуры, будем рассматривать проблему для произвольной информационной системы, функционирующей в динамических слоях сети. Очевидно, что при миграции контейнеров/виртуальных машин время конфигурации в сильной степени будет зависеть от характеристик сети: чем выше скорость передачи данных, тем меньше соответственно времени потребуется на перемещение данных и на реконфигурацию в целом. Однако необходимо отметить, что край сети далеко не всегда обладает желаемыми характеристиками линий связи, что, в свою очередь, требует дополнительных мер по сокращению времени реконфигурации.

Рассмотрим выражение, позволяющее связать ВБР устройства и его загруженность [12]:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{dL/10} t}, \quad (1)$$

где λ_0 – интенсивность отказов незагруженного устройства;

L – загруженность вычислительного устройства.

Введем также понятие пользовательской операции: пользовательской операцией в контексте данной работы является процедура сбора, обработки данных и предоставления пользователю результа-

тов. Следует отметить, что время пользовательской операции для распределенных интернет-систем может составлять часы, поскольку, например, сбор данных может осуществляться посредством краулинга интернет-источников, противодействующих ему.

Под остаточным ресурсом системы устройств, реализующих вычисления в рамках функциональных задач информационной системы будем понимать следующее:

$$\Delta P = \prod_i P_i(T_0) - \prod_i P_i(T_{op}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $P_i(T_0)$ – ВБР i -го устройства на начало пользовательской операции;

$P_i(T_{op})$ – ВБР i -го устройства на конец пользовательской операции.

Соответственно, с уменьшением значения ΔP происходит увеличение остаточного ресурса [11,12].

Рассмотрим выражение (1). Значение ВБР на конец пользовательской операции зависит от загруженности устройства, которая, в том числе, зависит от доли времени, которая отводится для решения непосредственно функциональных задач. Реконфигурации, которые при этом происходят, уменьшают фактическое время для решения функциональных задач, поскольку реконфигурация является сама по себе вычислительной задачей, необходимость решения которой возникает в непредсказуемые моменты времени (рис.1). При этом реконфигурация также влияет на остаточный ресурс устройства.

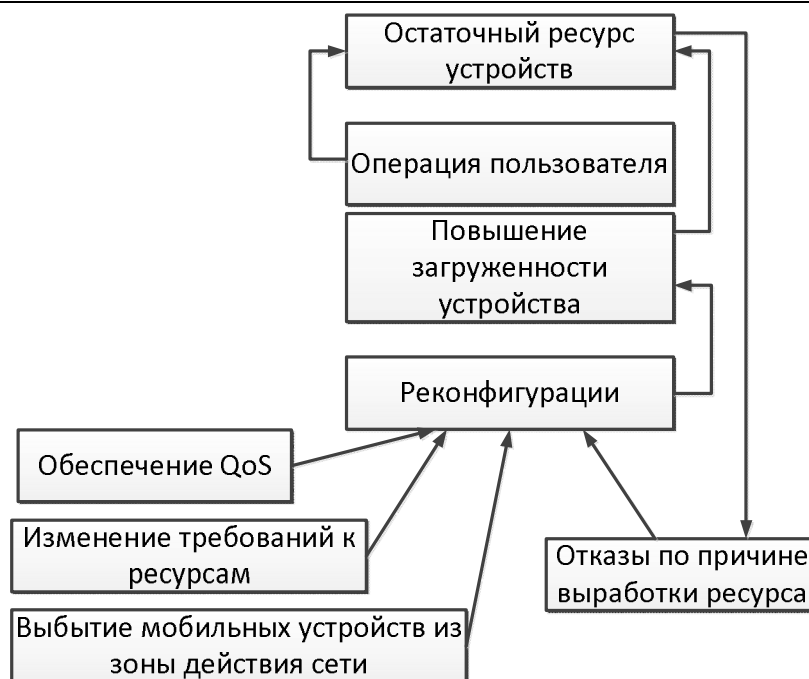


Рис.1. Взаимное влияние параметров системы

Fig. 1. Mutual influence of system parameters

В основе предлагаемой методики лежит следующее утверждение: уменьшение суммарного времени реконфигураций на пользовательскую операцию

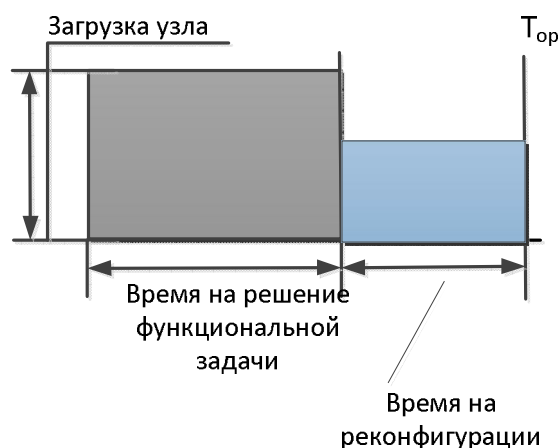
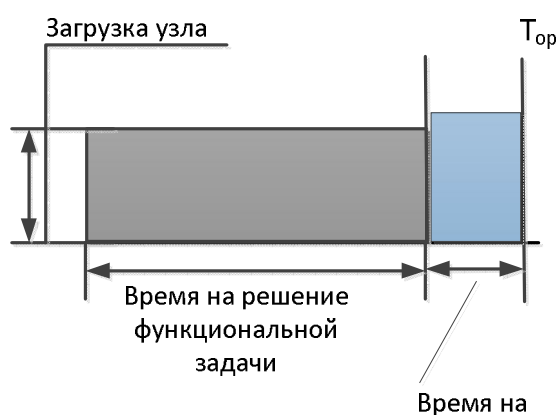


Рис. 2. Влияние времени реконфигураций на загруженность устройства

Fig. 2. Effect on reconfiguration time on device utilization

Время, требующееся на реконфигурацию, может быть уменьшено путем повышения нагрузки на вычислительное устройство, однако это приводит к ухудшению значений остаточных ресурсов

позволяет таким образом распределить нагрузку с учетом дополнительного времени, что при этом снизится значение (2) (рис.2)



устройств. По этой причине предлагается уменьшить время реконфигурации за счет применения такого метода управления элементами информационной системой, который бы для условий функ-

ционирования системы позволит сократить время реконфигурации.

В свою очередь, время реконфигурации складывается из:

- времени детекции отказа устройства (выбытия его из коллектива решающих устройств в рамках системы);
- времени формирования нового коллектива устройств.

В рамках данной работы проведено исследование зависимости времени детекции отказа для базовых методов управления системами:

- централизованного [13];
- с распределенным лидером [14-17];
- полностью децентрализованного [18-20].

На основе численного моделирования сформулирована методика выбора способа управления системой, которая позволяет уменьшить время реконфигурации и тем самым увеличить время, которое может быть потрачено на решение функциональных задач информационной системы.

Методы управления системой

Централизованное управление предполагает наличие узла, который в коллективе вычислительных устройств является лидером. Несомненным преимуществом такого подхода к организации управления является относительная простота реализации и высокое быстродействие в случае отказа одного из узлов-последователей. Однако в случае отказа лидера, система становится неуправляемой. Данная проблема решается путем

введения резерва для узла-лидера, однако такой резерв требует дополнительной синхронизации данных с лидером, что ставит под вопрос целесообразность такого подхода.

Хорошей альтернативой организации отказоустойчивой системы с лидером является построение распределенного лидера. Такой подход используется во многих системах репликации данных [14-17] и описан в протоколах RAFT, ViewStamped Replication. В рамках подхода с распределенным лидером операции реализуются следующим образом: время функционирования системы разбивается на раунды (эпохи). В пределах одной эпохи функционирует один лидер, который, в случае отказа, заменяется другим. Достоинством данного метода является то, что он объединяет в себе достоинства централизованного метода (простоту реализации и скорость), но при этом обладает отказоустойчивостью, что, в свою очередь, актуально для динамичных слоев сети.

И, наконец, третий, рассмотренный здесь метод управления системой – полностью децентрализованный [18-20], при котором узлы эквивалентны и обладают унифицированным набором функций. Однако при высоких показателях надежности такой метод, во-первых, предполагает избыточность информационного обмена, во-вторых, в случае отказа узлов принимается совместное решение по поводу, какие именно узлы отказали. Это занимает дополнительное время.

Восстановление системы после отказа включает время детекции отказа и изменение конфигурации (новая привязка программных компонент к узлам). Соответственно, уменьшение времени детекции отказа, поиска и принятия новой конфигурации позволяет сократить время реконфигурации системы. Однако поиск новой конфигурации может быть оптимизирован путем выбора методов стохастического поиска, а также выбора методов распараллеливания, в то время как сокращение времени детекции отказа предлагается произвести путем выбора наиболее подходящего метода управления системой.

Приведем аналитические модели времени, необходимого для детекции отказа в рамках трех перечисленных методов управления.

При централизованном управлении детекция отказов заключается в следующем:

- необходимо зафиксировать отсутствие сигнала от подчиненного узла;
- просмотреть список узлов и объявить некоторые из них отказавшими.

Время, необходимое для детекции отказа таким способом, может быть оценено как:

$$O(D_{min}) + O(N-F) \leq t \leq O(D_{max}) + O(N-F). \quad (3)$$

Детекция отказа с распределенным лидером складывается из следующих действий:

- фиксация отказа лидером, или
- фиксация подчиненным отказа лидера;
- установление связи с членами группы;

- выборы нового лидера;
- составление списка отказавших узлов лидером.

Время реконфигурации, соответственно, описывается выражением

$$O(D_{min}) + O(N-F) \leq t \leq 2O(D_{max}) + 2(N-F)O(D_{max}) + O(N-F). \quad (4)$$

Детекция отказа в системе с полностью децентрализованным управлением будет состоять из следующих шагов:

- фиксация отказа узла;
- обмен списками потенциально отказавших узлов;
- достижение консенсуса по отказавшим узлам;
- если консенсус не состоялся, повторить процедуру.

И, таким образом, оценивается как показано в выражении:

$$2O(D_{min}) + O(NF) \leq t \leq K(2O(D_{max}) + O(NF)). \quad (5)$$

В следующем разделе будут приведены результаты моделирования, сформированные предварительные выводы по результатам и представлена методика, полученная на основе моделирования.

Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования

На основе аналитических оценок проведем серию экспериментов для зависимостей времени от:

- численности группы устройств при одном отказе (рис.3,4);
- максимального диаметра сети устройств при одном отказе (рис.5,6);
- количества одновременно отказавших устройств в сети (рис.7,8).

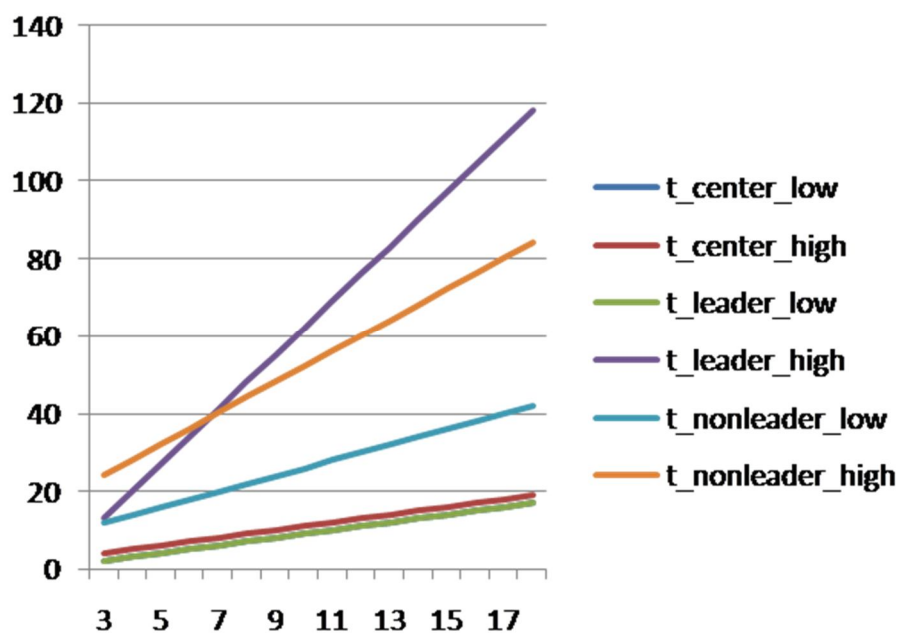


Рис. 3. Зависимость времени детекции от численности группы при диаметре сети=3

Fig. 3. Dependence of detection time on group number at network diameter = 3

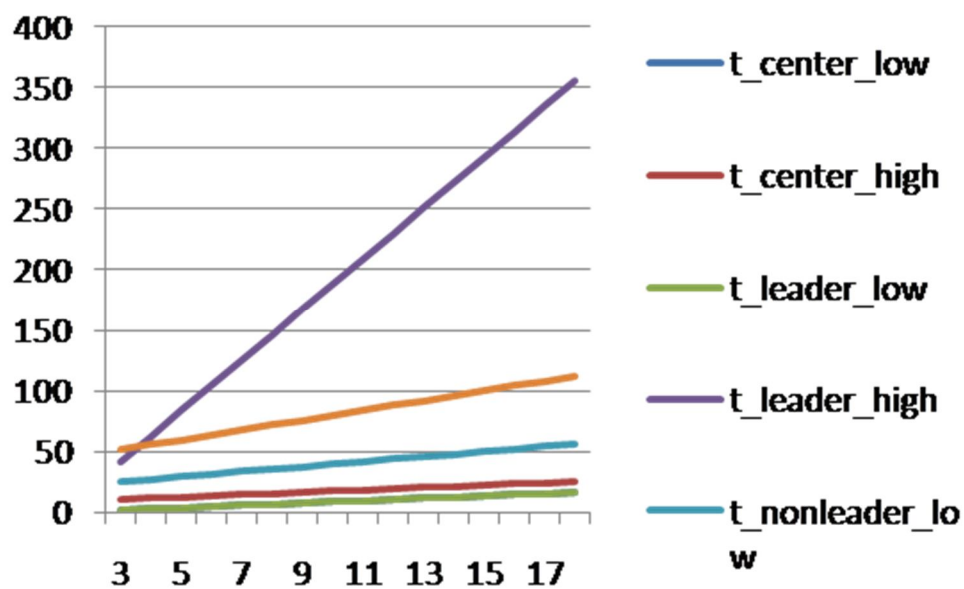


Рис. 4. Зависимость времени детекции от численности группы при диаметре сети=10

Fig. 4. Dependence of detection time on group number at network diameter =10

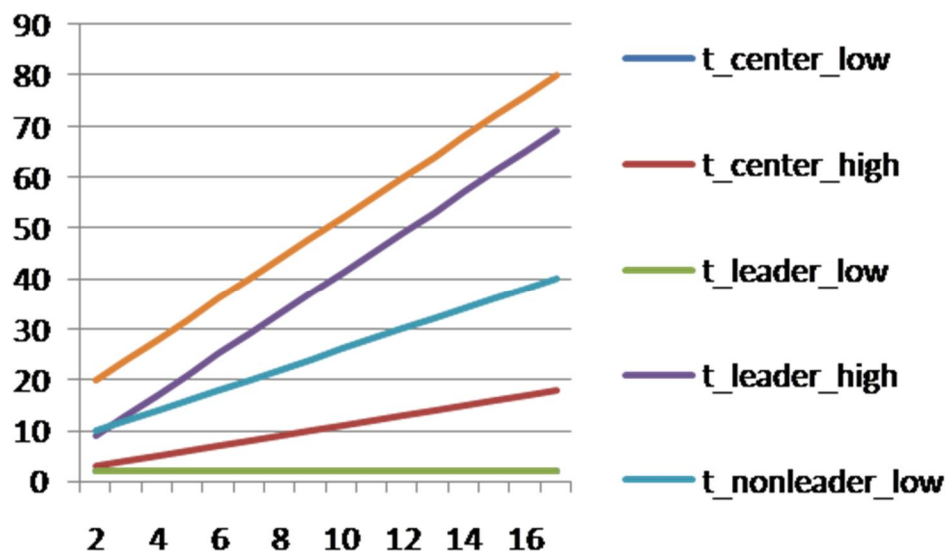


Рис. 5. Зависимость времени детекции от максимального диаметра сети при количестве устройств=3

Fig. 5. Dependence of detection time on maximum diameter of network at 3 devices

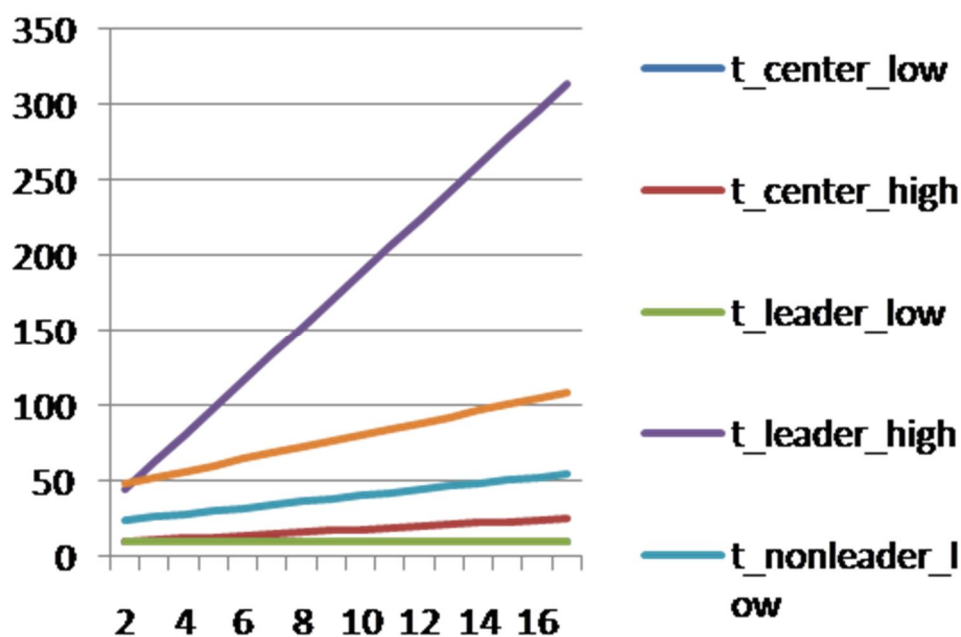


Рис. 6. Зависимость времени детекции от максимального диаметра сети при количестве устройств=10

Рис. 6. Dependence of detection time on maximum diameter of network at 10 devices

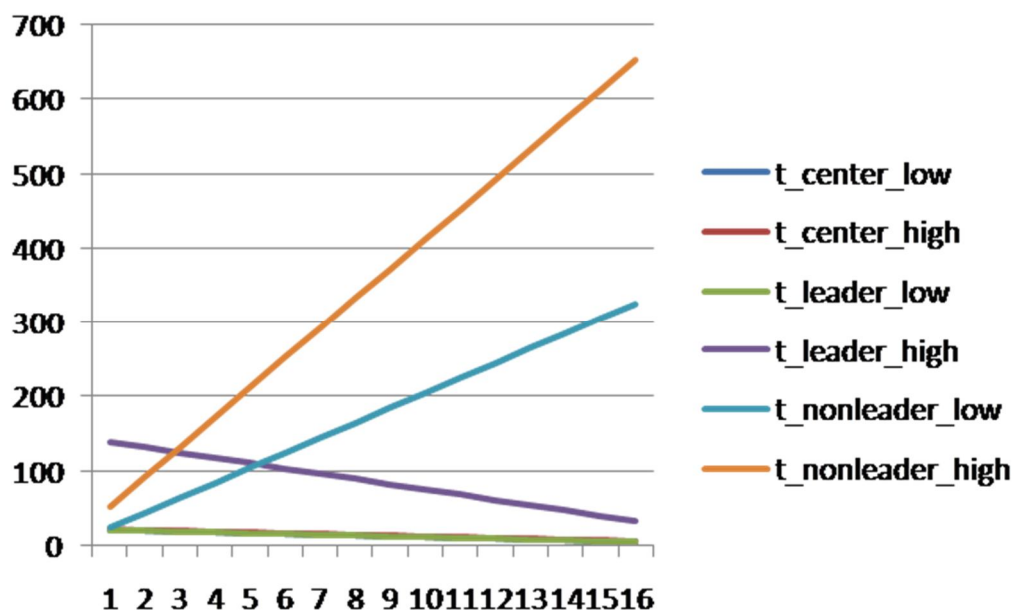


Рис. 7. Зависимость времени детекции от количества одновременно отказавших устройств при $D_{\max}=3$; $N=20$

Рис. 7. The dependence of detection time on the number of simultaneously failed devices at $D_{\max} = 3$; $N=20$

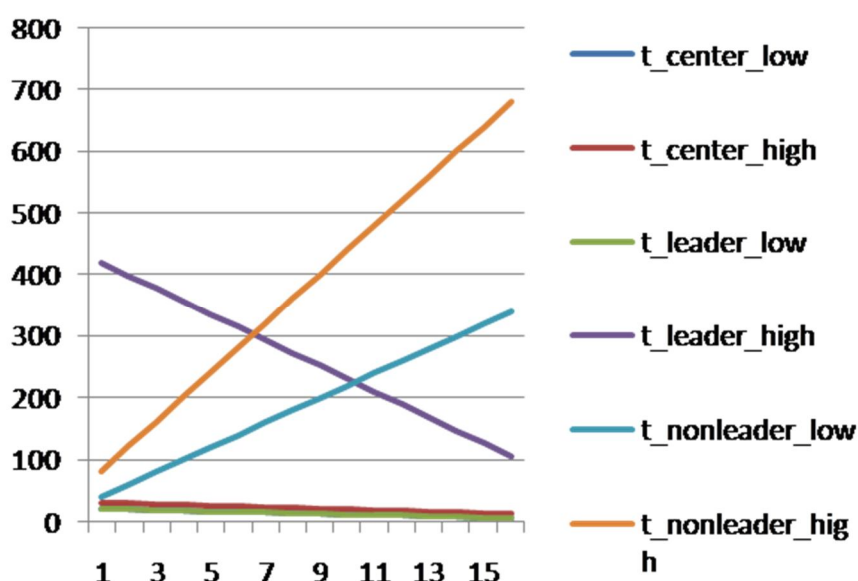


Рис. 8. Зависимость времени детекции от количества одновременно отказавших устройств при $D_{\max}=10$; $N=20$

Fig. 8. Dependence of detection time on the number of simultaneously failed devices at

Наиболее весомые выводы, сделанные по результатам моделирования, следующие:

– при управлении системой на основе метода с распределенным лидером, наихудший результат получается в

случае отказа лидера, но при этом, в случае отказов узлов-последователей, время детекции равно времени детекции централизованного метода, что гораздо лучше, чем при полностью децентрализованном управлении;

– при отказах узлов более одного метод с распределенным лидером пока-

зывает лучший результат по причине сокращения относительного объема информации для обмена.

Сведем результаты моделирования в табл. 1, соотнося количественные результаты и свойства системы (параметры диаметр сети, количество узлов и их статичность).

Таблица 1. Применение методов управления

Table 1. Application of management methods

Сменный лидер / Replacement leader	Децентрализованное управление / Decentralized management
Малое количество задействованных устройств	Произвольное количество задействованных узлов
Малый диаметр сети	Произвольный диаметр сети
Высокая динамичность устройств (одновременный отказ от $\frac{1}{4}$ общей группы) при малом диаметре сети	Высокая динамичность узлов при одновременных отказах малого количества устройств
Наличие подгруппы узлов с высокими показателями статичности	Гомогенная группа по признаку статичности

Таким образом, на основании полученных данных может быть сформирована методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры.

Методика выбора способа управления

Основываясь на результатах моделирования, можно сделать определенные выводы о возможности выбора того или иного метода управления системой узлов, функционирующих в динамическом слое сети с целью сокращения времени реконфигурации. Последователь-

ность действий в рамках предлагаемой методики приведена на рис. 9.

Таким образом, определяющим условием в выборе метода управления с децентрализованным лидером является наличие группы статичных узлов, на которых может функционировать распределенный лидер. Это объясняется тем, что процедура смены лидера (а именно, пересылка контекстных данных и синхронизация узлов-последователей с лидером) является времязатратной и нивелирует все преимущества распределенного лидера по сравнению с про-

чими методами управления в том случае, если отказывает лидер.

Поскольку методики, ориентированные на сокращение времени реконфигурации, не рассматривают изменение ВБР устройства как целевую функцию, для оценки результата применения разработанной методики сравним значения ВБР устройства для $t=100$ ч. для раз-

личных значений доли времени, выделяемого на реконфигурацию (рис.10).

Видно, что с увеличением доли времени, тратящегося на реконфигурационные процессы, значение ВБР устройства ухудшается и достигает значимых величин (порядка 10%), когда реконфигурации начинают занимать более 55% времени пользовательской операции.

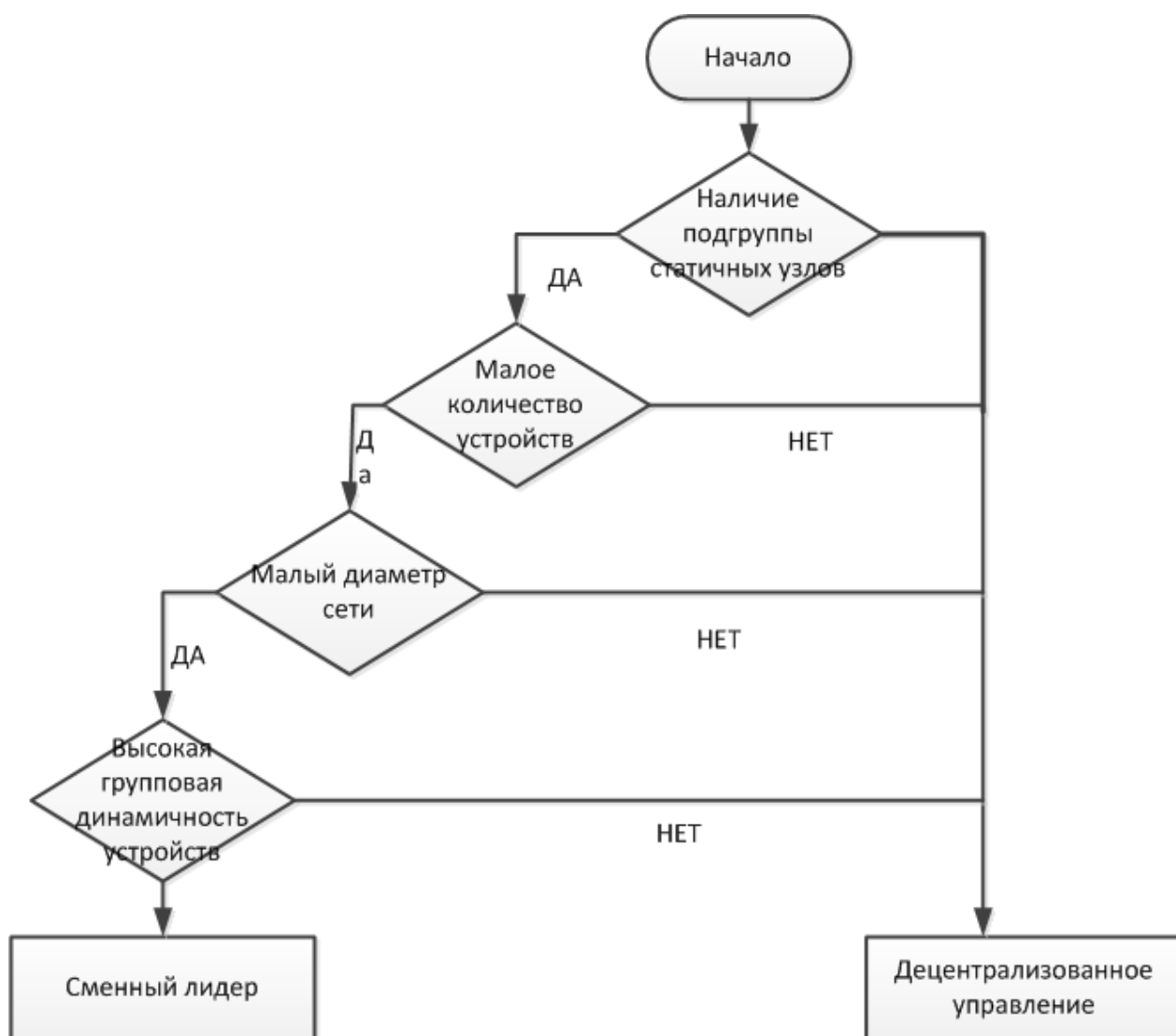


Рис. 9. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры

Рис. 9. Methodology of how to choose management method of distributed information systems in a highly dynamic network infrastructure

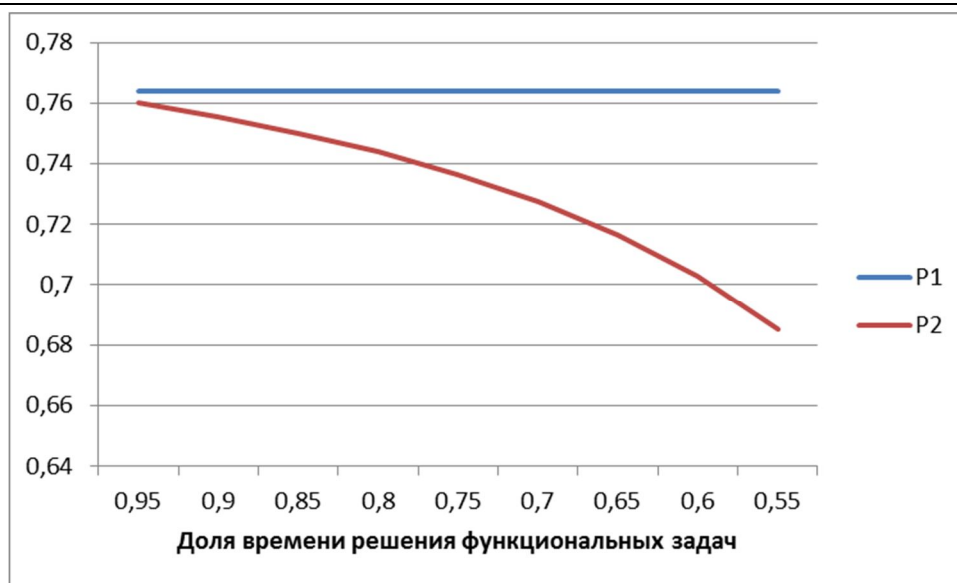


Рис. 10. Зависимость значения ВБР устройства в зависимости от доли времени пользовательской операции, используемой для решения функциональной задачи

Рис. 10. Dependence of FFO device value on the proportion of user operation time used to solve functional problem

Выводы

В данной статье предложена методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры с целью уменьшения расхода ресурса вычислительных узлов, который достигается за счет сокращения времени реконфигурации системы и, таким образом, позволяет использовать дополнительное время для решения вычислительных задач информационных

систем и тем самым снизить загруженность вычислительных узлов.

Моделирование временных затрат для различных методов управления распределенными информационными системами позволило выделить условия, при которых более целесообразно использовать метод управления с распределенным лидером, тогда как в остальных случаях целесообразно реализовать управление на основе децентрализованного метода управления.

Список литературы

1. Container Migration in the Fog: A Performance Evaluation / Puliafito Carlo, Vallati Carlo, Mingozzi Enzo, Merlino Giovanni, Longo Francesco, Puliafito Antonio // Sensors. 2019. 1488. 10.3390/s19071488.
2. Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter / Taleb Tarik, Dutta Sunny, Ksentini Adlen, Iqbal Muddesar, Flinck Hannu // IEEE Communications Magazine. 2017. N55. P. 38-43. 10.1109/MCOM.2017.1600249CM.

3. Rejiba Zeineb, Masip Xavi, Marin-Tordera E. A Survey on Mobility-Induced Service Migration in the Fog, Edge, and Related Computing Paradigms // ACM Computing Surveys. 2019. N 52. P. 1-33. 10.1145/3326540.
4. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning // IEEE Wireless Communications Letters. 2019. P. 1-1. 10.1109/LWC.2019.2922605.
5. Saggu Deepak, Azim Akramul. Transfer Learning on the Edge Networks. P.1-8. 10.1109/SysCon48628.2021.9447110.
6. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning // IEEE Wireless Communications Letters. 2019. P.1-1. 10.1109/LWC.2019.2922605.
7. Niu Guanchong, Cao Qi, Pun Man-on. QoS-Aware Resource Allocation for Mobile Edge Networks: User Association, Precoding and Power Allocation // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. PP. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3076353.
- 8.. Completion Time Minimization for UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems / Xu Yu, Zhang Tiankui, Loo Jonathan, Yang Dingcheng, Xiao Lin // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. PP. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3112853.
9. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization / Ren Jinke, Yu Guanding, He Yinghui, Li Geoffrey // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. P. 1-1. 10.1109/TVT.2019.2904244.
10. Partial Offloading for Latency Minimization in Mobile-Edge Computing / Ren Jinke, Yu Guanding, Cai Yunlong, He Yinghui, Qu Fengzhong // 2017. 1-6. 10.1109/GLOCOM.2017.8254550.
11. Klimenko Anna, Kalyaev Igor. A Technique to Provide an Efficient System Recovery in the Fog- and Edge-Environments of Robotic Systems. 2021. 10.1007/978-3-030-87725-5_9.
12. Korovin I., Melnik E., Klimenko A.A Recovery Method for the Robotic Decentralized Control System with Performance Redundancy. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2016. Lecture Notes in Computer Science, 2016. Vol 9812. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_2
13. Gardner Raymond. Centralized control systems, DCS, and SCADA. 202010.1201/9781003091134-17.
14. Liskov Barbara, Cowling James. Viewstamped Replication Revisited, 2012
15. Petrescu M., Petrescu R. Log Replication in Raft vs Kafka // Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica. 2020. 65. 66. 10.24193/subbi.2020.2.05.
16. Oki B. Viewstamped replication for highly available distributed systems. 2021
17. Howard Heidi, Charapko Aleksey, Mortier Richard. Fast Flexible Paxos: Relaxing Quorum Intersection for Fast Paxos. 2021. P.186-190. 10.1145/3427796.3427815.
18. Müller Jörg. Decentralized Information Systems: Paradigms, Architectures, and Applications, 2021.

19. Castro Oom, Correia Miguel. Practical Byzantine fault tolerance. 2001
20. König, Hans-Jürgen. Competitive Advantages through Flexible Design of Decentralized Information Systems. 199410.1007/978-3-642-46955-8_72.

References

1. Puliafito Carlo, Vallati Carlo, Mingozi Enzo, Merlino Giovanni, Longo Francesco, Puliafito Antonio Container Migration in the Fog: A Performance Evaluation. *Sensors*. 201919. 1488. 10.3390/s19071488.
2. Taleb Tarik, Dutta Sunny, Ksentini Adlen, Iqbal Muddesar, Flinck Hannu Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter. *IEEE Communications Magazine*. 2017, no. 55, pp. 38-43. 10.1109/MCOM.2017.1600249CM.
3. Rejiba Zeineb, Masip Xavi, Marin-Tordera E. A Survey on Mobility-Induced Service Migration in the Fog, Edge, and Related Computing Paradigms. *ACM Computing Surveys*. 2019, no. 52, pp. 1-33. 10.1145/3326540.
4. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, pp. 1-1. 10.1109/LWC.2019.2922605.
5. Saggi Deepak, Azim Akramul. Transfer Learning on the Edge Networks, pp.1-8. 10.1109/SysCon48628.2021.9447110.
6. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019, pp.1-1. 10.1109/LWC.2019.2922605.
7. Niu Guanchong, Cao Qi, Pun Man-on. QoS-Aware Resource Allocation for Mobile Edge Networks: User Association, Precoding and Power Allocation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, pp. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3076353.
8. Xu Yu, Zhang Tiankui, Loo Jonathan, Yang Dingcheng, Xiao Lin Completion Time Minimization for UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021, pp. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3112853.
9. Ren Jinke, Yu Guanding, He Yinghui, Li Geoffrey. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. P. 1-1. 10.1109/TVT.2019.2904244.
10. Ren Jinke, Yu Guanding, Cai Yunlong, He Yinghui, Qu Fengzhong Partial Offloading for Latency Minimization in Mobile-Edge Computing. 2017, pp.1-6. 10.1109/GLOCOM.2017.8254550.
11. Klimenko Anna, Kalyaev Igor. A Technique to Provide an Efficient System Recovery in the Fog- and Edge-Environments of Robotic Systems. 2021. 10.1007/978-3-030-87725-5_9.
12. Korovin I., Melnik E., Klimenko A.A Recovery Method for the Robotic Decentralized Control System with Performance Redundancy. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcherya-

kov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2016. Lecture Notes in Computer Science, 2016, vol 9812. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_2

13. Gardner Raymond. Centralized control systems, DCS, and SCADA. 202010.1201/9781003091134-17.

14. Liskov Barbara, Cowling James. Viewstamped Replication Revisited. 2012

15. Petrescu M., Petrescu R. Log Replication in Raft vs Kafka. Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica. 2020. 65. 66. 10.24193/subbi.2020.2.05.

16. Oki B. Viewstamped replication for highly available distributed systems. 2021

17. Howard Heidi, Charapko Aleksey, Mortier Richard. Fast Flexible Paxos: Relaxing Quorum Intersection for Fast Paxos. 2021. P.186-190. 10.1145/3427796.3427815.

18. Müller Jörg. Decentralized Information Systems: Paradigms, Architectures, and Applications, 2021

19. Castro Oom, Correia Miguel. Practical Byzantine fault tolerance. 2001

20. König, Hans-Jürgen. Competitive Advantages through Flexible Design of Decentralized Information Systems. 199410.1007/978-3-642-46955-8_72.

Информация об авторе / Information about the Author

Клименко Анна Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НИИ Многопроцессорных вычислительных систем им. Академика Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Anna B. Klimenko, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Research Fellow of Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Двухэтапный подход к распознаванию коррозии металлических конструкций с использованием сверточных нейронных сетей в ходе проведения инспекций промышленных объектов

К. Д. Русаков¹ ✉, А. В. Чехов¹

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 1, г. Москва 117342, Российская Федерация

✉ e-mail: rusakov.msk@yandex.ru

Резюме

Цель исследования: Распознавание коррозии на металлических конструкциях является серьезной проблемой в проведение инспекций промышленных объектов. Существующие подходы к анализу изображений имеют тенденцию использовать все изображения для распознавания участков, поврежденных коррозией, что не подходит как для структурного анализа, так как процент ошибок при таком подходе очень велик. В условиях прогнозирования коррозии по всему изображению возможны ошибки, связанные с прогнозируемой маской не на металлической конструкции. В связи с этим необходимо удалять результаты прогнозирования положительного класса для участков, поврежденных коррозией, но не размещенных на металлической конструкции. Поэтому в данной работе авторы разработали двухэтапный подход к распознаванию коррозии металлических конструкций, тем самым достигая цель – повышение точности распознавания.

Методы. В этой статье мы применяем две модели глубокого обучения, ориентированные на семантическую сегментацию (DeepLabv3, BiSeNetV2) для обнаружения коррозии, которые работают лучше с точки зрения точности и времени и требуют меньшего количества аннотированных образцов по сравнению с другими глубокими моделями, например, Unet, FCN, Mask-RCNN. В работе предложен новый подход к распознаванию металлических участков, поврежденных коррозией, на основе совмещения двух сверточных нейронных сетей для более точного пиксельного предсказания глубинными моделями архитектуры DeepLabv3 и BiSeNetV2.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований проводился расчет точности и F1 меры с использованием моделей FCN, Unet, Mask-RCNN, а также предложенного подхода. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что предложенный подход состоящий в совмещении сетей DeepLabv3 и BiSeNetV2 на 3 % повышает точность и F1 меру для алгоритма Unet, на 10% точность и 2% F1 меру для Mask R-CNN и на 12 % точности и 4 % F1 меру для FCN сети. Экспериментальные результаты и сравнения с реальными наборами данных подтверждают эффективность предложенной схемы даже для очень сложных изображений с множеством типов дефектов. Производительность оценивалась на базе данных, аннотированной экспертами.

Заключение. В статье проведен анализ существующих решений в области распознавания металлических конструкций, поврежденных коррозией, и выявлены недостатки существующих решений, основанных либо на детекции очагов коррозии, либо на попиксельной сегментации полного изображения. В данной работе предложен новый подход к распознаванию металлических участков, поврежденных коррозией, на основе совмещения двух сверточных нейронных сетей для более точного пиксельного предсказания DeepLabv3 и BiSeNetV2. Производительность оценивается на базе данных, аннотированной экспертами по метрикам Precision и F1-score

Ключевые слова: вертикальные инспекции; семантическая сегментация; глубокое обучение; обнаружение коррозии; сверточные нейронные сети.

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

Для цитирования: Русаков К. Д., Чехов А. В. Двухэтапный подход к распознаванию коррозии металлических конструкций с использованием сверточных нейронных сетей в ходе проведения инспекций промышленных объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 152-166. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-152-166>.

Поступила в редакцию 24.08.2021

Подписана в печать 30.09.2021

Опубликована 21.10.2021

Two-step Approach to Corrosion Detection of Metal Structures Using Convolutional Neural Networks When Inspecting Industrial Facilities

Konstantin D. Rusakov¹ ✉, Anton V. Chekhov¹

¹ V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
65 Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: rusakov.msk@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Corrosion recognition on metal structures is a serious problem in conducting inspections of industrial facilities. Existing approaches to image analysis use all images to recognize areas damaged by corrosion, which is not suitable for structural analysis, since the percentage of errors in this approach is very large. Under conditions of corrosion prediction throughout the image, errors related to predictive mask not on metal structure are possible. Therefore, it is necessary to delete the results of positive class prediction for areas damaged by corrosion but not placed on metal structure. Therefore, in this work, the authors have developed two-step approach for recognizing corrosion of metal structures, thereby achieving the goal of improving recognition accuracy.

Methods. We implement two deep learning models focused on Semantic segmentation (DeepLabv3, BiSeNetV2) for corrosion detection that work better in terms of accuracy and time and require fewer annotated samples compared to other deep models, such as Unet, FCN, Mask-RCNN. A new detection approach to metal areas damaged by corrosion, based on the combination of two convolutional neural networks for more accurate pixel prediction by depth architecture models: DeepLabv3 and BiSeNetV2.

Results. Experimental studies have calculated the accuracy and F1 measures using FCN, Unet, Mask-RCNN models as well as the proposed approach. Based on obtained results, it was concluded that proposed approach of combining DeepLabv3 and BiSeNetV2 networks increases accuracy and F1 measure for Unet algorithm by 3%, accuracy by 10% and 2% F1 measure for Mask R-CNN and by 12% accuracy and 4% F1 measure for FCN network. Experimental results and comparisons with real data sets confirm the effectiveness of proposed scheme even for very complex images with many different defects. Productivity was assessed based on data annotated by experts.

Conclusion. Analyses of existing solutions in the field of recognition of metal structures damaged by corrosion is described. Shortcomings of existing solutions based either on detection of corrosion sites or on pixel segmentation of full image are identified. A new approach to the recognition of metal areas damaged by corrosion based on the combination of two convolutional neural networks for more accurate pixel prediction of DeepLabv3 and BiSeNetV2 is introduced. Production is evaluated based on data annotated by Precision and F1-score metrics experts.

Keywords: vertical inspections; semantic segmentation; deep learning; corrosion detection; convolutional neural networks.

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

For citation: Rusakov K. D., Chekhov A. V. Two-step approach to corrosion detection of metal structures using convolutional neural networks when inspecting industrial facilities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = Proceedings of the Southwest State University. 2021; 25(3): 152-166 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-152-166>.

Received 24.08.2021

Accepted 30.09.2021

Published 21.10.2021

Введение

Металлические конструкции широко используются в энергетике, например в линиях электропередач (ЛЭП), инфраструктуре связи (вышках сотовой связи), транспортных инфраструктурах (мосты). Ржавчина и коррозия могут привести к серьезным проблемам с безопасностью. Следовательно, обнаружение металлических дефектов является серьезной проблемой для обеспечения быстрого, эффективного, но также безопасного осмотра, оценки и обслуживания инфраструктуры [1] и борьбы с явлениями разрушения материалов, которые возникают из-за нескольких факторов, таких, как изменение климата и погодные явления, а также проведения инспекций, в том числе с использованием БПЛА [2]. Современные подходы к анализу изображений для обнаружения дефектов основаны на ограничивающих рамках, размещаемых вокруг дефектных областей, чтобы помочь инженерам быстро сосредоточиться на повреждениях [3]. Однако такие подходы не подходят для структурного анализа, поскольку для оценки состояния дефекта требуются несколько показателей (на-

пример, площадь, соотношение сторон, максимальное расстояние). Таким образом, нам нужна более точная классификация на уровне пикселей. Распознавание коррозии в реальном времени необходимо для быстрого осмотра критически важной инфраструктуры, особенно в крупномасштабных структурах.

В настоящее время наблюдается большой интерес к методам глубокого обучения [4, 5, 6, 7, 8], в том числе и в целях обнаружения коррозии. Авторы [9] применяли сверточные нейронные сети (CNN) для идентификации ржавчины по полученным в качестве входных данных 2D-изображениям. Другие подходы используют структуру сверточных нейронных сетей для обнаружения трещин в бетонной и стальной инфраструктуре [10], повреждений дорог [11] и дефектов металлических поверхностей в железных дорогах [12]. Авторы в работе [13] объединяют сверточную нейронную сеть и схему объединения данных Байеса для обнаружения трещин на атомных электростанциях. Основная проблема всех вышеупомянутых подходов состоит в том, что они используют традиционные глубинные модели, такие как сверточные ней-

ронные сети, которые требуют большого количества аннотированных данных. В нашем случае такой сбор – сложная задача, так как аннотация должна выполняться экспертами на пиксельном уровне. По этой причине большинство существующих методов оценивают дефектные области через граничные рамки. Кроме того, существующие подходы попиксельного прогнозирования также не справляются с задачей, так как требуют большого количества изображений для точной работы. Чтобы устранить эти ограничения, мы используем двухэтапный подход к глубокому обучению, на основе нейронных сетей DeepLabv3 [14] и BiSeNetV2 [15] для семантической сегментации. Эффективность конкретных методов уже подтверждена медицинской визуализацией (например, обнаружение опухоли головного мозга) [16].

Материалы и методы

С точки зрения визуального осмотра поверхность, поврежденная коррозией, более шероховатая, чем поверхность некоррозийного участка, и её цвет выглядит как оттенок между красным и коричневым. Поиск коррозионных участков на металлической конструкции – это особый случай семантической сегментации. Во многих случаях обнаружение коррозионных участков на металлических конструкциях гораздо более сложная задача по сравнению с семан-

тической сегментацией объектов, таких как люди, здания и автомобили в городской среде, где формы объектов правильные и четко очерченные. Точно так же объекты на медицинских изображениях хорошо изучены и обычно имеют четко определенные формы с некоторыми вариациями. Дефекты, которые необходимо выявить, очень необычны, например, трещины, проколы и коррозия [17]. Один из подходов к построению архитектур сверточных нейронных сетей для семантической сегментации состоит в выборе структуры кодера и декодера. Предварительно обученная сверточная нейронная сеть, такая как ResNet, используется в качестве кодировщика и изучает отличительные особенности данных. Затем полученный эмбединг (закодированный вектор) подключается к сети декодера, которая прогнозирует фактические пиксели изображения.

В условиях прогнозирования коррозии по всему изображению, возможны ошибки, связанные с прогнозируемой маской не на металлической конструкции. В связи с этим необходимо результаты прогнозирования положительного класса для участков, поврежденных коррозией, но не размещенных на металлической конструкции удалять. Для этих целей будем использовать дополнительную сверточную нейронную сеть для семантической сегментации фона.

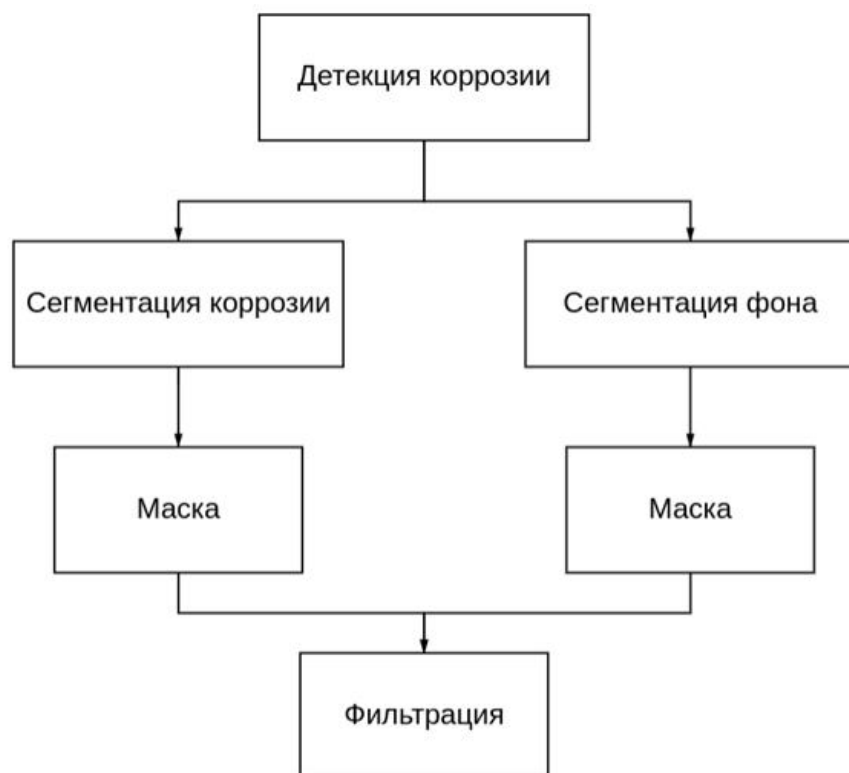


Рис. 1. Блок схема алгоритма детекции коррозии

Fig. 1. Block diagram of corrosion detection algorithm

В задачах прогнозирования маски коррозии металлической конструкции очень важно находить границы поврежденной области, а потому декодер должен работать максимально эффективно. В качестве архитектуры прогнозирования маски коррозии металлической конструкции выбрана DeepLabv3+, содержащая эффективный модуль декодирования для уточнения результатов сегментации, в том числе по границам объектов [14] (рис. 2).

Семантическая информация закодирована в выходном эмбединге кодера DeepLabv3, а модуль декодера позволяет детально восстанавливать границы объекта. Авторы [14] демонстрируют улучшение с точки зрения скоро-

сти и точности путем адаптации модели Xception [18] для задачи семантической сегментации и применения жесткой разделяемой свертки как к модулям пулинга пространственных пирамид, так и к модулям декодера.

Для создания входных изображений были подготовлены 117 изображений разрешением 4056x3040, на которых была размечены все области, подверженные коррозией. На первом шаге подготовки данных, в целях повышения качества все изображения были разбиты на множество мелких изображений размером 256x256.

Данный шаг позволил извлечь максимальное количество информации из изображений высокой четкости для

лучшего распознавания коррозии. На втором шаге была произведена следующая аугментация данных:

- Случайный поворот изображения на угол не более 30 градусов со сдвигом и масштабированием на 20 %.
- Случайное вертикальное и горизонтальное отображение изображений.

– Случайное изменение яркости и контраста на 10 %.

– Оптическое искажение изображения (криволинейное).

– Оптическое искажение сетки изображений.

– Случайные эластичные преобразования изображений.

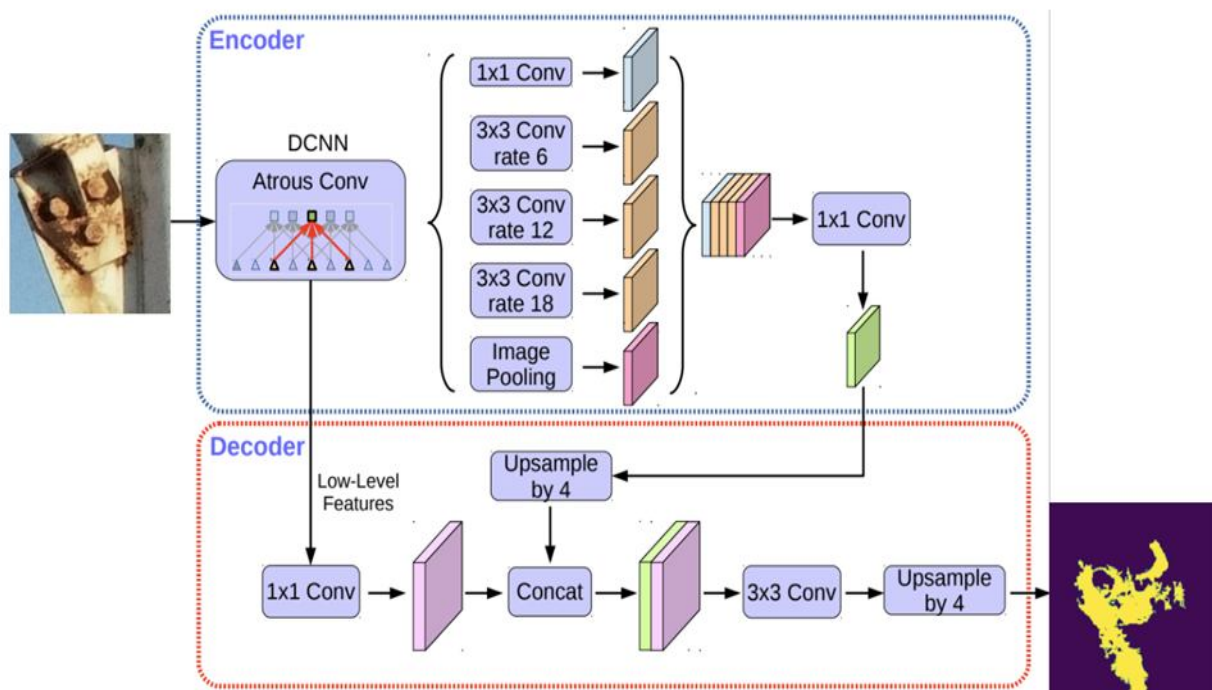


Рис.2. Архитектура DeepLabv3+

Fig. 2. DeepLabv3+ architecture

Следующие обучающие изображения были сгенерированы с использованием процесса аугментации и кропа (рис. 3):

- 2700 изображений металлической конструкции с коррозионным повреждением для обучения;
- 500 изображений металлической конструкции с коррозионным повреждением для валидации.

Сверточная нейронная сеть была настроена на обучение с размером пакета 4 в течение 40 эпох. Механизм ранней остановки использовался для прекращения обучения после того, как не было заметного улучшения в течение 5 последовательных эпох. В результате общее время обучения составило 30 эпох. В конце обучения наша сеть дала среднее значение IoU 0.26 на валидации, а коэффициент Dice достиг 0.34 на валидации (рис. 4).

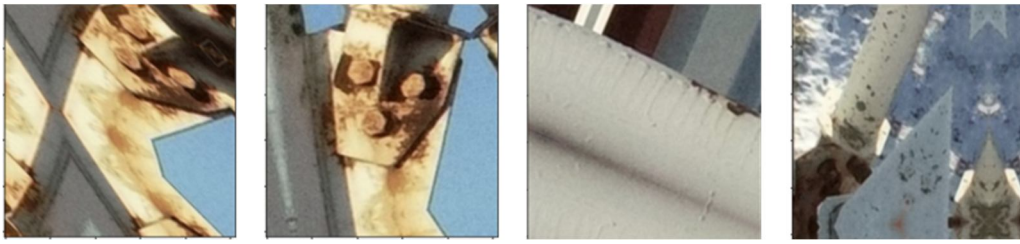


Рис. 3. Примеры аугментированных изображений

Fig. 3. Examples of augmented images

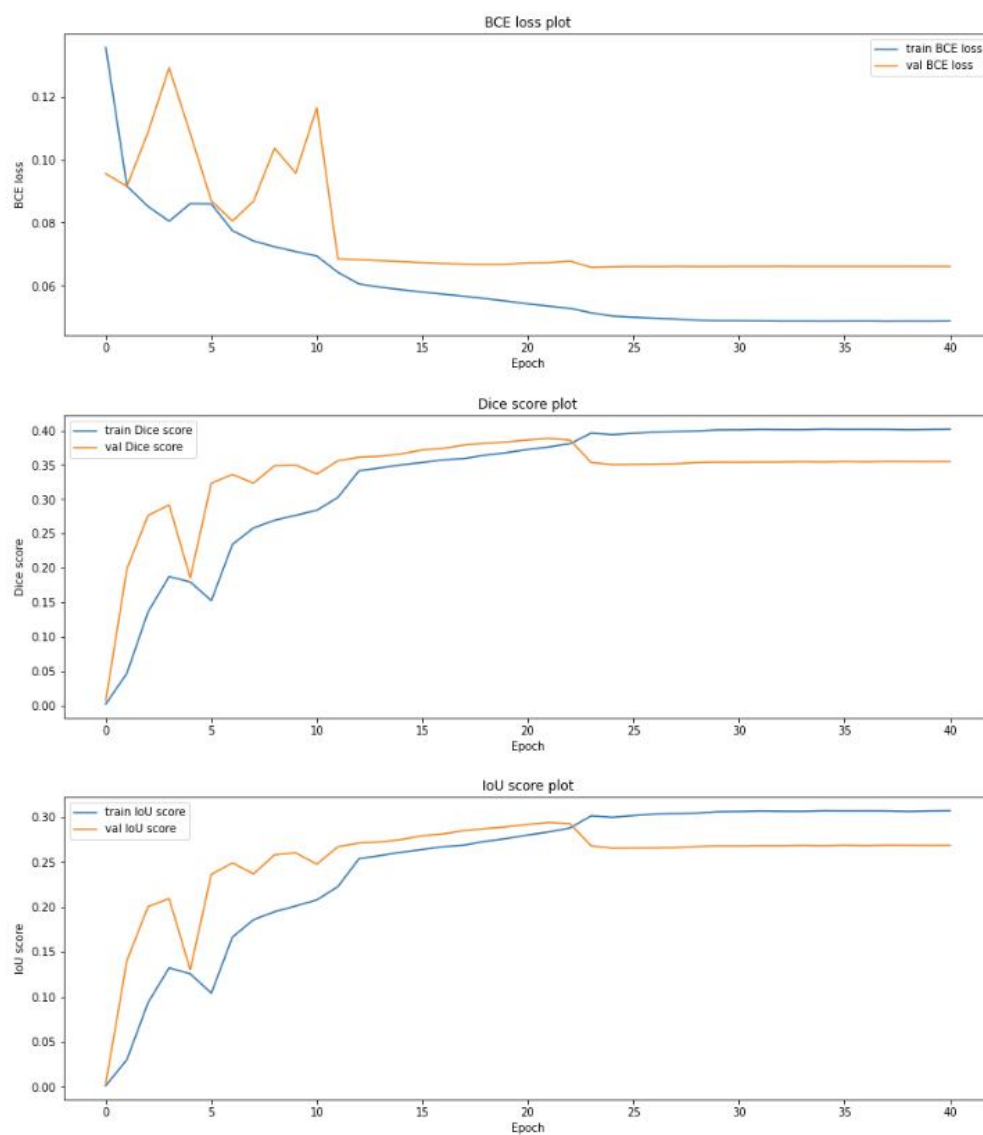


Рис. 4. Графики качества обучения модели

Fig. 4. Model Training Quality Graphs

В задачах прогнозирования маски металлической конструкции и отделения её от фона также важно находить границы самой металлической конструкции, при этом важна скорость прогнозирования маски, так как это влияет на общую скорость распознавания коррозии.

С этой целью выбрана эффективная и действенная архитектура с хорошим компромиссом между скоростью и точностью, называемая сетью двусторонней сегментации BiSeNetV2 [15]. Эта архитектура включает в себя:

- детальную ветвь с широкими каналами и мелкими слоями для захвата низкоуровневых деталей и генерации

представления объектов с высоким разрешением;

- семантическую ветвь с узкими каналами и глубокими слоями для получения семантического контекста высокого уровня.

В основе структуры BiSeNetV2 три компонента: двухканальная магистраль в фиолетовой пунктирной рамке, слой агрегации в оранжевой пунктирной рамке и бустерная часть в желтой пунктирной рамке. Магистраль с двумя путями имеет Детальную ветвь (синие кубики) и Семантическую ветвь (зеленые кубики). Между тем, числа в кубах – это отношение размера карты объектов к разрешению входных данных (рис. 5).

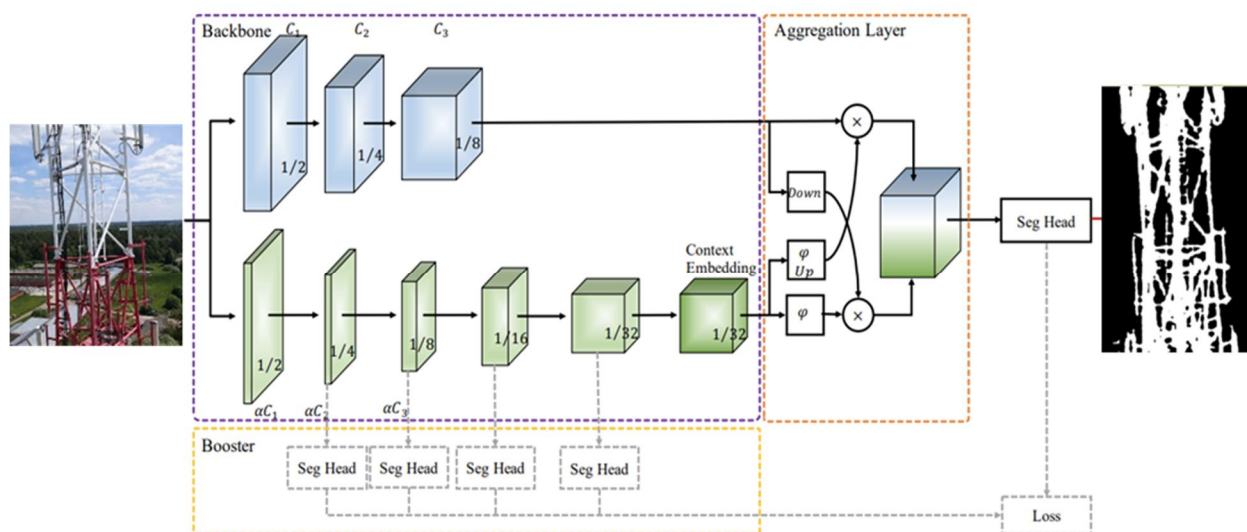


Рис. 5. Архитектура BiSeNetV2

Fig. 5. BiSeNetV2 architecture

В части уровня агрегации применяется двусторонний уровень агрегации. Кроме того, в бустерной части разработаны несколько вспомогательных голов

сегментации, чтобы улучшить производительность сегментации без каких-либо дополнительных затрат на логический вывод.



Рис. 6. Аугментированное изображения для фильтрации фона

Fig. 6. Augmented image for background filtering

Были подготовлены 280 изображений разрешением 5472x3078, на которых была размечена вся металлическая конструкция. Изображения для упрощения разметки снимались только на фоне неба. На первом шаге подготовки данных, в целях повышения скорости все изображения были разбиты на 4 ровных части, при этом фон у каждой части менялся случайно, но, таким образом, чтобы внизу изображения всегда была земля, дома, лес, а вверху изображения – небо. Экспериментально выявлено, что именно данная аугментация позволяет качественно решить задачу фильтрации фона. На втором шаге была произведена следующая аугментация данных:

- случайный поворот изображения на угол не более 30 градусов со сдвигом и масштабированием на 20%;

- случайное вертикальное и горизонтальное отображение изображений;

- случайное изменение яркости и контраста на 10%.

Следующие обучающие изображения были сгенерированы с использованием процесса аугментации и кропа:

- 8462 изображения металлической конструкции для обучения;

- 1256 изображений металлической конструкции для валидации.

Сверточная нейронная сеть была настроена на обучение с размером пакета 4 в течение 120 эпох. Механизм ранней остановки использовался для прекращения обучения после того, как не было заметного улучшения в течение 5 последовательных эпох. В результате общее время обучения составило 95 эпох. В конце обучения реализованная сеть дала среднее значение IoU 0.84 на валидации. Это значение указывает на то, что предсказанные маски покрывают 84% истинной области коррозии в тестовом наборе.

Результаты и их обсуждение

На рис. 7 показана предсказанная маска из изображения в нашем тестовом наборе. Маска окрашена в красный цвет, чтобы выделяться на фоне металлической конструкции. Можно заметить, что прогноз учитывает сложную форму очага коррозии, выделяя только поврежденную коррозией область и игнорируя «чистую» металлическую конструкцию. Вместе с тем, видно, что модель ошибается на фоне изображения и прогнозирует на доме внизу коррозию.

На рис. 8 показана предсказанная маска из изображения в нашем тестовом наборе.

Сравнительные результаты точности и F1 меры [19] показаны в табл. 1. Предлагаемый двухэтапный подход улучшает точность и показатель F1 по сравнению с существующими решениями попиксельной сегментации всего изображения. Метрики измерялись на валидационном наборе данных металлической конструкции – вышке сотовой связи.



Рис. 7. Результат предсказания модели сегментации коррозии

Fig. 7. Prediction result of corrosion segmentation model

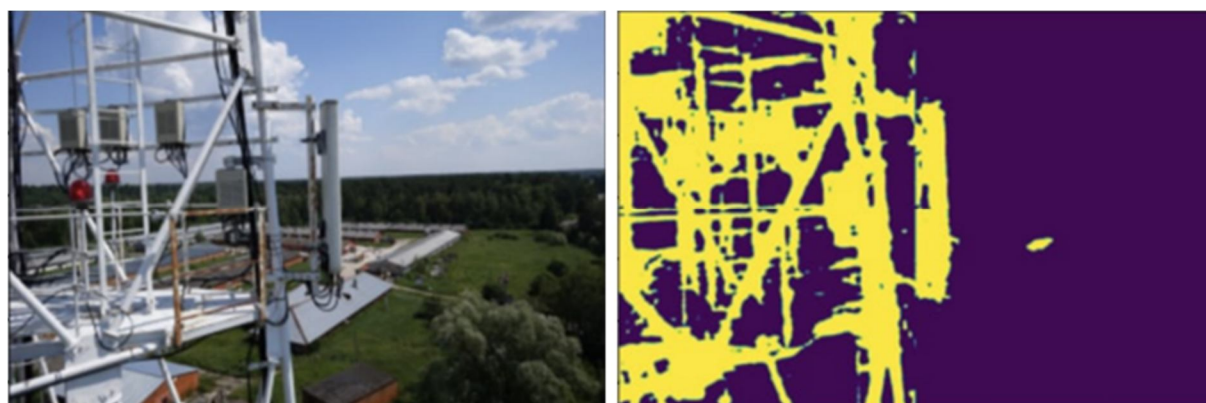


Рис. 8. Результат предсказания модели сегментации конструкции

Fig. 8. Prediction result of design segmentation model

Таблица 1

Table 1

Архитектура сети / Network architecture	Precision	F1-score
FCN	0,7	0,71
Unet	0,79	0,72
Mask R-CNN	0,72	0,73
DeepLabv3 + BiSeNetV2	0,82	0,75

Выводы

В статье проведен анализ существующих решений в области распознавания металлических конструкций, поврежденных коррозией, и выявлены недостатки существующих решений, основанных либо на детекции очагов коррозии, либо на попиксельной сегментации полного изображения.

В данной работе предложен новый подход к распознаванию металлических участков, поврежденных коррозией, на основе совмещения двух сверточных нейронных сетей для более точного пиксельного предсказания. Глубинными моделями были DeepLabv3 и BiSeNetV2.

На первом этапе нейронная сеть DeepLabv3 прогнозирует наличие коррозионных участков на металлической конструкции, а на втором этапе нейронная сеть BiSeNetV2 сегментирует металлическую конструкцию. Экспериментальные результаты и сравнения с реальными наборами данных подтверждают эффективность предложенной схемы даже для очень сложных изображений с множеством типов дефектов. Производительность оценивается на базе данных, аннотированной экспертами.

В дальнейшем исследовании планируется оптимизировать [20] две отдельные нейронные сети в одну, для ускорения вычислений.

Список литературы

1. Image processing algorithms for crack detection in welded structures via pulsed eddy current thermal imaging / Z. Liu, G. Lu, X. Liu, X. Jiang, and G. Lodewijks // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2017. Vol. 20. N. 4. P. 34–44.
2. An application of swarm of quadcopters for searching operations / Р.В. Мещеряков, П.М. Трефилов, А.В. Чехов, С.А. Диане, К.Д. Русаков, Е.А. Лесив, М.А. Колодочка, К.О. Щукин, А.К. Новосельский, Е.И. Гончарова // IFAC-PapersOnLine. Sozopol, Bulgaria: Elsevier, 2019. Vol. 52, is. 25. P. 14-18 .
3. Automatic crack detection for tunnel inspection using deep learning and heuristic image post-processing / E. Protopapadakis, A. Voulodimos, A. Doulamis, N. Doulamis, T. Stathaki // Applied Intelligence. 2019. Vol. 49. No. 7. P. 2793–2806.

4. Вычислительный метод распознавания образов по видеоизображениям с использованием глубоких нейронных сетей со сверточными и рекуррентными слоями с приложениями для транспортных систем / О.С. Амосов, С.Г. Амосова, С.В. Жиганов, Ю.С. Иванов // Информатика и системы управления. 2019. № 1 (59). С. 18-35.

5. Амосов О.С., Амосова С.Г. The Neural Network Method for Detection and Recognition of Moving Objects in Trajectory Tracking Tasks according to the Video Stream // Proceedings of the 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS-2019). СПб.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019. С. 43-46.

6. 1-D convolutional neural network based on the inner ear principle to automatically assess human's emotional state / Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering (TPACEE 2020) / А.О. Исхакова, Д.А. Вольф, Р.Р. Галин, М.В. Мамченко // E3S Web of Conferences. Moscow: E3S Web Conf., 2020. Vol. 224.

7. Амосов О.С., Амосова С.Г., Иочков И.О. Вычислительный метод на основе глубоких нейронных сетей для обнаружения и классификации дефектов, возникающих в заклепочных соединениях авиационной техники // Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 736-738.

8. Бобырь М. В. Проектирование нейронных и нечетких моделей в области вычислительной техники и систем управления. М.: Аргмак-Медиа, 2018. 110 с.

9. Corrosion Identification of Fittings Based on Computer Vision / Z. Tian, G. Zhang, Y. Liao, R. Li, F. Huang // International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM). 2019. P. 592-597. <https://doi.org/10.1109/AIAM48774.2019.00123>.

10. Young-Jin Cha, Wooram Choi, Oral Buyukozturk, "Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 32. No. 5. P. 361–378.

11. Road crack detection using deep convolutional neural network / L. Zhang, F. Yang, Y.D. Zhang, Y. J. Zhu // IEEE international conference on image processing (ICIP). IEEE, 2016. P. 3708–3712.

12. Soukup D., Huber-Mork R. Convolutional neural networks for steel surface defect detection from photometric stereo images, in International Symposium on Visual Computing. Springer, 2014. P. 668–677.

13. Fu-Chen Chen, Mohammad R Jahanshahi. Nbcnn: Deep learning-based crack detection using convolutional neural network and naïve bayes data fusion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 65. N. 5. P. 4392–4400.

14. Chen LC., Zhu Y., Papandreou G., Schroff F., Adam H. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science. Vol 11211. Springer, Cham.

15. Yu Changqian, Gao Changxin, Wang, Jingbo, Yu, Gang, Shen Chunhua, Sang Nong. BiSeNet V2: Bilateral Network with Guided Aggregation for Real-time Semantic Segmentation. 2020
16. Automatic brain tumor detection and segmentation using u-net based fully convolutional networks / H. Dong, G. Yang, F. Liu, Y. Mo, Y. Guo // Annual conference on medical image understanding and analysis. Springer, 2017. P. 506–517.
17. Das S., Hollander C. D., Suliman S. Automating Visual Inspection with Convolutional Neural Networks // Annual Conference of the PHM Society, 2019. N. 11(1).
18. Chollet F.: Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In: CVPR. 2017.
19. Воротнев Д. В., Голованов Р. В. Методика обучения бинарных классификаторов в задачах сегментации изображений // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24. № 3. С. 279-290. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-3-279-290>.
20. Бобырь М. В., Ноливос С. К. А., Матиез Л. А. С. Алгоритм ускоренной обработки изображений в системах технического зрения интеллектуальных мобильных роботов // Медико-экологические информационные технологии - 2020 : сборник научных статей по материалам XXIII Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Курск, 2020. С. 200-205.

References

1. Liu Z., Lu G., Liu X., Jiang X., Lodewijks G. Image processing algorithms for crack detection in welded structures via pulsed eddy current thermal imaging. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 34–44.
2. Meshcheryakov R.V., Trefilov P.M., Chekhov A.V., Diana S.A., Rusakov K.D., Levitskiy E.A., Kolodochka M.A., Shchukin K.O., Novoselsky A.K., Goncharova E.I. An application of swarm of quadcopters for searching operations. IFAC-PapersOnLine. Sozopol, Bulgaria, 2019, vol. 52, is. 25, pp. 14-18 .
3. Protopapadakis E., Voulodimos A., Doulamis A., Doulamis N., Stathaki T. Automatic crack detection for tunnel inspection using deep learning and heuristic image post-processing. *Applied Intelligence*, 2019, vol. 49, no. 7, pp. 2793–2806.
4. Amosov O.S., Amosova S.G., Zhiganov S.V., Ivanov Yu.S. Vychislitel'nyi metod raspoznavaniya obrazov po videoizobrazheniyam s ispol'zovaniem glubinnnykh neironnykh setei so svertochnymi i rekurrentnymi sloyami s prilozheniyami dlya transportnykh sistem [Computational method of image recognition from video images using deep neural networks with convolutional and recurrent layers with applications for transport systems]. *Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and Control Systems*, 2019, no. 1 (59), pp. 18-35.

5. Amosov O.S., Amosova S.G. The Neural Network Method for Detection and Recognition of Moving Objects in Trajectory Tracking Tasks according to the Video Stream. *Proceedings of the 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS-2019)*. Saint Petersburg, 2019, pp. 43-46.
6. Iskhakova A.O., Wolf D.A., Galin R.R., Mamchenko M.V. 1-D convolutional neural network based on the inner ear principle to automatically assess human's emotional state. *Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering (TPACEE 2020)*. E3S Web of Conferences. Moscow, 2020, vol. 224.
7. Amosov O.S., Amosova S.G., Iochkov I.O. [Computational method based on deep neural networks for the detection and classification of defects arising in riveted joints of aircraft]. *Materialy 12-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» (MLSD'2019, Moskva)* [Materials of the 12th International Conference "Management of Large-Scale Systems Development" (MLSD'2019, Moscow)]. Moscow, IPU RAN Publ., 2019, pp. 736-738 (In Russ).
8. Bobyr M.V. *Proektirovanie neironnykh i nechetkikh modelei v oblasti vychislitel'noi tekhniki i sistem upravleniya* [Design of neural and fuzzy models in the field of computer technology and control systems]. Moscow, Argamak-Media Publ., 2018. 110 p.
9. Tian Z., Zhang G., Liao Y., Li R., Huang F. Corrosion Identification of Fittings Based on Computer Vision. *International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM)*, 2019, pp. 592-597. <https://doi.org/10.1109/AIAM48774.2019.00123>.
10. Young-Jin Cha, Wooram Choi, and Oral Buyukozturk, Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, vol. 32, no. 5, pp. 361–378.
11. Zhang L., Yang F., Zhang Y.D., Zhu Y. J. Road crack detection using deep convolutional neural network. *IEEE international conference on image processing (ICIP)*. IEEE, 2016, pp. 3708–3712.
12. Soukup D., Huber-Mork R. Convolutional neural networks for steel surface defect detection from photometric stereo images in International Symposium on Visual Computing. Springer, 2014, pp. 668–677.
13. Fu-Chen Chen, Mohammad R Jahanshahi Nbcnn: Deep learning-based crack detection using convolutional neural network and naïve bayes data fusion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 65, no. 5, pp. 4392–4400.
14. Chen LC., Zhu Y., Papandreou G., Schroff F., Adam H. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) *Computer Vision – ECCV 2018*. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science, 2018, vol 11211. Springer, Cham.

15. Yu Changqian, Gao Changxin, Wang Jingbo, Yu Gang, Shen Chunhua, Sang Nong. BiSeNet V2: Bilateral Network with Guided Aggregation for Real-time Semantic Segmentation. 2020.
16. Dong H., Yang G., Liu F., Mo Y., Guo Y., Automatic brain tumor detection and segmentation using u-net based fully convolutional networks. Annual conference on medical image understanding and analysis. Springer, 2017, pp. 506–517.
17. Das S., Hollander C. D., Suliman, S. Automating Visual Inspection with Convolutional Neural Networks. *Annual Conference of the PHM Society*, 2019, 11(1).
18. Chollet, F.: Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In: CVPR. 2017.
19. Vorotnev D.V., Golovanov R.V. Metodika obucheniya binarnykh klassifikatorov v zadachakh segmentatsii izobrazhenii [Methodology for teaching binary classifiers in image segmentation problems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Higher Educational Institutions. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 279-290. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-3-279-290>.
20. Bobyr M. V., Nolivos S. K. A., Matiez L. A. [Algorithm of accelerated image processing in technical vision systems of intelligent mobile robots]. *Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii - 2020. Sbornik nauchnykh statei po materialam XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Medico-ecological information technologies - 2020. Collection of scientific articles based on the materials of the XXIII International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2020, pp. 200-205 (In Russ).

Информация об авторах / Information about the Authors

Русаков Константин Дмитриевич, научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: rusakov.msk@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1895-8001>

Konstantin D. Rusakov, Research Associate, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: rusakov.msk@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1895-8001>

Чехов Антон Валерьевич, ведущий эксперт, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: achekhov@gmail.com

Anton V. Chekhov, Leading Expert, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: achekhov@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-167-180>

Оценка параметров высокоскоростных линий связи для высоконадежных реконфигурируемых систем на базе S-параметров и BER

М. В. Орда-Жигулина^{1,2} ✉

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук
пр. Чехова, д. 41, г. Ростов-на-Дону 344006, Российская Федерация

² Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров
пер. Итальянский, д. 106, г. Таганрог 347900, Российская Федерация

✉ e-mail: jigulina@mail.ru

Резюме

Цель исследования: улучшение параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи сигнала, в том числе между программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Такое улучшение параметров передачи сигнала с учетом влияния на них электрических и конструктивных параметров многослойных печатных плат (МПП) необходимо для повышения пропускной способности современных высоконадежных реконфигурируемых систем для обеспечения скорости передачи данных до десятков Гбит/с. Обеспечение таких высоких скоростей передачи данных становится возможным за счет использования более широкой полосы частот передаваемых сигналов. Одним из существующих подходов к решению такой задачи является увеличение «физической» частоты передаваемых информационных сигналов до 25-300 ГГц, что является достаточным для достижения требуемых скоростей.

Методы. В данной статье предложен метод оценки качества высокоскоростных линий передачи сигнала на базе определения таких стандартизированных методов анализа параметров передачи сигнала, как JCOM, S-параметров и BER, которые позволяют оценивать высокоскоростные линии передачи связи. Так, для оценки качества цифрового канала связи может использоваться параметр JCOM (the Channel Operating Margin (COM)/JCOM) – стандартизированный метод определения общего показателя качества канала. Для оценки затухания и потерь информационного сигнала в тракте, когда отраженные от неоднородностей копии сигнала воздействуют на оригинал и приводят к его искажению, используются известные методы оценки таких параметров передачи сигнала, как коэффициент отражения S11 и коэффициент ослабления S21 (S-Parameters). Моделирование такого параметра, как интенсивность битовых ошибок Bit Error Rate (BER) происходит согласно методике нормирования и контроля качества G.821/G.826/M2100.

Результаты. На основе оценки таких параметров передачи сигнала, как Channel Operating Margin (COM), S-параметров и Bit Error Rate (BER) были выбраны основные метрики для оценки качества высокоскоростных линий передачи сигнала. Были получены численные оценки параметров передачи сигнала и оценено их влияние на конструктивные параметры высокоскоростных линий передачи сигнала. В частности, для скорости передачи данных менее 25 Гбит/с рекомендуется использовать не менее 1 переходного отверстия между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см² площади МПП. Рекомендуется использовать не менее 2-х переходных отверстий между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см² площади МПП, если высокоскоростная линия передачи сигнала проходит на расстоянии ближе 2,5 см от цепей питания в проекции на слой, где расположены цепи питания.

Заключение. В статье предложен метод расчета параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи сигналов на базе расчета параметров Channel Operating Margin (COM), S-параметров и Bit Error Rate (BER). В рамках предложенного метода был проведен анализ параметров передачи сигнала, который показал, что при соблюдении «эталонных» значений электрических параметров линии наибольший вклад в искажение сигнала вносят переводные отверстия, затем слои, в которых расположена сигнальная линия, количество экранирующих полигонов между сигнальными слоями и слоями, в которых проходят цепи питания, конструктивные параметры переходных отверстий, а также длина и количество сегментов высокоскоростной линии. Были даны численные оценки минимального количества переходных отверстий и их диаметра, длины сегментов дифференциальных пар. Данные результаты могут быть использованы на этапе пред-проектного моделирования (pre-layout analysis) высокоскоростных линий передачи сигнала для вычислительных модулей высоконадежных реконфигурируемых систем.

Ключевые слова: системы сбора и обработки данных; высоконадежные реконфигурируемые системы; анализ целостности сигнала; высокоскоростные линии связи; МПП высоконадежных реконфигурируемых систем; BER; COM; S-параметры.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, No.AAAA-A19-11901190173-6.

Для цитирования: Орда-Жигулина М. В. Оценка параметров высокоскоростных линий связи для высоконадежных реконфигурируемых систем на базе S-параметров и BER // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 168-180. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-168-180>.

Поступила в редакцию 14.08.2021

Подписана в печать 29.09.2021

Опубликована 21.10.2021

Evaluation of High-Speed Link Parameters for Highly Reliable Reconfigurable Systems Based on S-Parameters and BER

Marina V. Orda-Zhigulina ^{1,2} ✉

¹ Southern Scientific Center of the RAS
41 Chekhov ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation

² Supercomputers and Neurocomputers Research Center
106 Italian Lane, Taganrog 344006, Russian Federation

✉ e-mail: jigulina@mail.ru

Abstract

Purpose of research. is to improve signal transmission parameters in high-speed signal transmission lines, including between programmable logic integrated circuits (PLIC). This improvement in signal transmission parameters is necessary to increase throughput of modern highly reliable reconfigurable systems to ensure data transfer rate of up to tens of Gbit/s. It can be done considering the influence of electrical and structural parameters of multi-layer printed circuit boards (MPCB) on them. It is possible to provide such high data rates by using a wider frequency band of transmitted signals. One of the existing approaches to this problem is to increase "physical" frequency of transmitted information signals to 25-300 GHz, which is sufficient to achieve desired rates.

Methods. A method for estimating quality of high-speed signal transmission lines based on the definition of standardized methods for analyzing signal transmission parameters, such as JCOM, S-parameters and BER is proposed in the article. This method allows evaluating high-speed communication lines. Thus, the Channel Operating Margin (COM)/JCOM parameter can be used to estimate the quality of a digital communication channel - a standardized method for determining the overall channel quality indicator. Known methods are used to estimate such signal transmission parameters as S11 reflection coefficient and S21 attenuation coefficient (S-Parameters). These methods are used to estimate attenuation and loss of the information signal in the path, when copies of the signal reflected from inhomogeneities affect the original and lead to its distortion. Simulation of such parameter as Bit Error Rate (BER) is carried out according to G.821/G.826/M2100 rationing and quality control methodology.

Results. The main metrics were selected to evaluate the quality of high-speed signal transmission lines. It is based on the evaluation of such signal transmission parameters as Channel Operating Margin (COM), S-parameters and Bit Error Rate (BER). Numerical evaluations of signal transmission parameters were obtained and their effect on the design parameters of high-speed signal transmission lines was estimated. It is recommended to use at least 1 transition hole between screening polygons in GND separation layers every 0.5 cm or 0.25 cm² of WFP area. It is for a data rate of less than 25 Gbit/s, It is recommended to use at least 2 transition holes between screening polygons in GND separation layers every 0.5 cm or 0.25 cm² of PV area, if high-speed signal transmission line passes at a distance of closer than 2.5 cm from the power supply circuits in a projection on the layer where the power supply circuits are located.

Conclusion. A method for calculating signal transmission parameters on high-speed signaling lines based on the calculation of Channel Operating Margin (COM), S-parameters and Bit Error Rate (BER) parameters is introduced. As part of introduced method, an analysis of signal transmission parameters was carried out. This analysis shows that when the "reference" values of electrical parameters of the line are met, the transfer holes contribute most to the signal distortion; then the layers in which the signal line is located, the number of screening polygons between the signal layers and the layers; in which the power supply circuits, the design parameters of the transition holes, as well as the length and number of segments of the high-speed line pass. Numerical evaluations of minimum number of transition holes and their diameter, the length of segments of differential pairs are given. These results can be used in pre-layout analysis step of high-speed signal transmission lines for computational modules of highly reliable reconfigurable systems.

Keywords: data collection and processing systems; highly reliable reconfigurable systems; analysis of signal integrity; high-speed links; WFP highly reliable reconfigurable systems; BER; COM; S-Parameters.

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

Funding: The publication was prepared as part of GZ SSC RAS N GR project №AAAA-A19- 119011190173-6.

For citation: Orda-Zhigulina M. V. Evaluation of High-Speed Link Parameters for Highly Reliable Reconfigurable Systems Based on S-Parameters and BER. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 168-180 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2021-25-3-168-180](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-168-180).

Received 14.08.2021

Accepted 29.09.2021

Published 21.10.2021

Введение

Оптимизация целостности сигнала в высокоскоростных линиях связи высоконадежных реконфигурируемых систем на основе анализа S-параметров необходима для улучшения параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи сигнала между про-

граммируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Высокоскоростные линии передачи сигнала вызывают между собой ПЛИС-передатчик и ПЛИС-приемник. При этом ПЛИС могут быть конструктивно расположены как на одной плате, так и на разных платах, входящих в один макет.

В настоящее время оценка достижимой скорости передачи данных возможна только после нескольких этапов макетирования и проверки передачи данных без ошибок на заданных скоростях. Макетирование стоит дорого, разработка топологии высокоскоростных линий передачи данных для каждого нового макета требует значительного времени.

Можно снизить себестоимость изготовления МПП за счет численного моделирования электрических параметров и параметров передачи сигнала высокоскоростных линий передачи сигнала на этапе предпроектного моделирования. Моделирование параметров может быть проведено с помощью современных технологий анализа целостности сигнала (signal integrity, channel operating margin и др.), в частности, с помощью методов и инструментов, реализованных в различных средах проектирования МПП [1-6].

При этом анализ промоделированных параметров позволяет заранее теоретически оценить максимальную обеспечиваемую скорость передачи данных еще на этапе разработки топологии МПП, до ее передачи в производство [1, 4, 6, 7-11]. Такой подход позволяет изготавливать меньшее число реальных макетов плат, которые ранее требовались для оценки максимально достижимой скорости передачи данных между вычислительными модулями ПЛИС.

Постановка задачи

Был проведен выбор параметров (метрик) передачи высокоскоростного сигнала для оценки качества высокоскоростных линий передачи данных на требуемой скорости передачи данных. Так, анализ целостности сигналов (signal integrity) условно разделяют на 3 этапа – анализ кристалла ПЛИС, корпуса ПЛИС и анализ печатной платы (либо нескольких печатных плат, соединенных между собой). В рамках разработанной методики приводится только анализ высокоскоростных линий передачи данных МПП в рамках одной платы, как показано на рис. 1.

Предполагаем, что целостность сигнала в ПЛИС уже учтена в данных анализа в виде поведенческих моделей IBIS, разработанных производителем ПЛИС.

В процессе моделирования анализ целостности сигналов разделяется на предтопологический (pre-layout) и посттопологический (post-layout) анализ. Предтопологический анализ заключается в предварительном исследовании вновь разрабатываемых высокоскоростных линий передачи данных для проверки обеспечиваемой скорости передачи данных путем анализа электрических параметров и параметров передачи сигнала высокоскоростной линии передачи данных. Посттопологический анализ заключается в максимально полном исследовании уже разработанной высокоскоростной линии передачи данных с учетом ее реальной топологии. В рам-

ках данной методики моделирование параметров линии на этапе было проведено в рамках пост-топологического

анализа для получения численных значений «эталонных» параметров передачи сигнала.



Рис. 1. Структурная схема расположения исследуемых высокочастотных линий передачи сигнала

Fig. 1. Block diagram of the investigated high-frequency signal transmission lines

Для моделирования параметров использовались методы оценки целостности сигнала (signal integrity) и метод channel operating margin [8]. Каждая высокоскоростная линия передачи данных может быть представлена как набор стандартных конструктивных элементов и представляет собой несимметричный полосковый волновод¹ [12-16]. Конструктивно линия начинается от капли припоя на выходе ПЛИС-передатчика и заканчивается на капле припоя на входе ПЛИС-приемника.

Высокоскоростная линия передачи данных конструктивно включает в себя места соединения ПЛИС с проводниками на верхнем сигнальном слое, сегменты проводников на внутренних сиг-

нальных слоях, переходные отверстия между сигнальными слоями, места соединения сегментов проводников с конденсаторами и т.д. Для определения числовых «эталонных» значений параметров нужно рассматривать высокоскоростную линию передачи данных (дифференциальную пару) в пределах одной платы.

Высокоскоростная линия передачи данных при этом включает в себя различные конструктивные элементы. Конструктивные элементы линии влияют на ее электрические параметры и на параметры передачи сигнала (в том числе, S-параметры) [7, 11]. Поэтому, при разработке топологии высокоскоростной линии необходимо контролировать все эти параметры.

Основным электрическим параметром, который контролируется в рамках стандартного метода разработки топологии, является волновое сопротивление Z_0 .

¹ Онучин М. Я. Анализ и параметрический синтез приемных трактов устройств передачи данных в распределительных информационно-вычислительных сетях: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 1994.

На этапе пост-проектного моделирования в уже изготовленном макете измеряется значение BER и из тех линий, которые передают сигнал без ошибок определяются «эталонные» высокоскоростные линии передачи данных, то есть те линии, которые позволяют передавать сигнал на заданной скорости передачи данных наилучшим образом. Такие линии должны обладать максимальной полосой пропускания и пропускной способностью, минимальным затуханием, максимальной равномерностью амплитудно-частотной характеристики при заданной пропускной способности (скорости передачи данных). Для таких «эталонных» высокоскоростных линий передачи сигнала моделируются численные значения их «эталонных» параметров.

В дальнейшем, на этапе предпроектного моделирования новых макетов, полученные «эталонные» значения параметров передачи высокоскоростного сигнала и топологию таких линий можно использовать как шаблон для вновь разрабатываемых макетов с целью обеспечения требуемых скоростей передачи данных. Если параметры вновь разработанной линии будут соответствовать «эталонным» значениям, то можно считать, что разработанная линия обеспечивает требуемую скорость передачи данных и макет можно отдавать на изготовление.

Если параметры вновь разработанных высокочастотных линий передачи

данных не будут соответствовать «эталонным» значениям, то необходимо доработать топологию МПП и использовать более качественные электронные компоненты (материал для изготовления МПП). После доработки нужно вновь провести моделирование параметров. Если доработанные параметры будут соответствовать «эталонным», то макет можно отдавать на изготовление.

Материалы и методы

В данной статье предложен метод оценки качества высокоскоростных линий передачи сигнала на базе определения параметров передачи сигнала, которые характеризуют высокоскоростные линии передачи связи. Для определения скорости передачи данных, которую должна обеспечить каждая вновь разрабатываемая высокоскоростная линия передачи данных, недостаточно контроля одних только электрических параметров. Также при разработке высокоскоростной линии передачи сигнала необходимо контролировать значения параметров передачи высокоскоростных сигналов.

В этом случае электрический сигнал, вышедший из передатчика, распространяющийся в линии передачи, должен быть правильно распознан на входе приемника. Форма, уровни напряжений и временные параметры сигнала должны точно соответствовать стандарту сигнала, например NRZ (non return to zero). Задача сохранения целостности сигнала в линии передачи и предполагает сохранение его первоначальной фор-

мы, которую линия передачи или внешние воздействия могут лишь изменить, нарушив первоначальную целостность.

Линия передачи, в общем случае - это среда распространения. В линию передачи сигнала входят все элементы между выходом передатчика и входом приемника. А именно, проводники печатных плат, соединительные провода между печатной платой и блочными соединителями, контакты соединителей, как межплатных, так и приборных, электрические компоненты. Для получения однородной линии передачи (именно в ней сигнал будет распространяться на максимальные расстояния без отражений) в каждом месте соединения указанных элементов необходимо согласование волнового сопротивления.

Волновое сопротивление линии передачи для одиночных линий должно иметь стандартное значение 50 Ом. Для дифференциальных линий передачи значение дифференциального волнового сопротивления должно равняться 100 Ом. Важно, чтобы на всем протяжении линии передачи волновое сопротивление резко не изменялось.

При резком изменении волнового сопротивления возникают неоднородности, которые являются причиной отражений. Отраженные от неоднородностей копии сигнала воздействуют на оригинал и приводят к его искажению. Для оценки степени отражения используют оценку такого параметра передачи сигнала, как коэффициент отражения S_{11} . Коэффициент отражения показы-

вает, какая часть энергии сигнала отразилась от неоднородности, исходя из различий сопротивлений в месте неоднородности.

Если получен минимальный коэффициент отражения, то второе, что требуется для сохранения целостности сигнала, это обеспечить такую амплитудно-частотную характеристику линии передачи, которая позволит передать все значимые составляющие спектра сигнала. Это либо первые пять гармоник, либо полоса частот, определяемая скоростью нарастания фронта/спада импульса. Если частотная характеристика линии передачи не имеет провалов, спада в области как нижних, так и верхних частот, резонансных подъемов и локальных всплесков, все составляющие спектра сигнала будут переданы без искажений и форма сигнала не будет нарушена. Фронт и спад останутся монотонными, а площадка импульса – ровной. Оценить равномерность частотной характеристики можно с помощью коэффициента ослабления S_{21} .

Если частотная характеристика линии передачи равномерна, остается решить третью задачу. Минимизировать затухание сигнала, влияние внешних сигналов, перекрестных искажений, шумов питания и земли.

Таким образом, целостность сигнала на входе приемника будет сохранена при заданной скорости передачи данных в случае выполнения трех условий: минимальный коэффициент отражения, равномерность частотной характери-

ки высокоскоростной линии передачи сигнала в заданной полосе частот и минимальное затухание сигнала при минимизации влияния внешних сигналов, перекрестных искажений, шумов питания и земли.

Перечень контролируемых основных метрик (параметров) передачи сигнала для анализа качества высокоскоростной линии передачи данных будет следующим: S-параметры (S-parameters) [17], которые затем должны быть сопоставлены с такими параметрами передачи сигнала, как Signal to noise ratio (SNR) и Bit Error Rat [7, 12].

Связь между максимально возможной пропускной способностью линии F (ГГц) и ее полосой пропускания C (Гбит/сек) может быть определена по соотношению Найквиста:

$$F = \frac{C}{2} \cdot \log_2 M,$$

где M – количество различных состояний информационного параметра (для формата кода низкого уровня, который соответствует двухуровневому коду NRZ (Non Return to Zero) $M=2$; C – максимальная пропускная способность линии (скорость передачи данных) в битах в секунду; F – ширина полосы пропускания линии в герцах.

Для оценки того, достижима ли заданная скорость передачи данных C (Гбит/сек) необходимо проводить анализ параметров передачи высокоскоростного сигнала МПП в частотной полосе F линии (ГГц), равной двум интер-

валам Найквиста, то есть прием F линии $\sim C$.

Пропускная способность линии F , и, соответственно, достижимая скорость передачи данных C , зависит от конструктивных параметров линии и от ее протяженности, а также от параметров ПЛИС и электронных компонентов, входящих в линию.

Считаем, что вновь разрабатываемая высокоскоростная линия передачи данных обеспечивает заданную скорость передачи данных только в случае, если достигнуты требуемые значения ее полосы пропускания F и пропускной способности C .

Требуемое значение полосы пропускания высокоскоростной линии передачи сигнала (transmitting capacity) C считается достигнутым, если значения S-параметров и других параметров передачи сигнала для каждой высокоскоростной линии передачи сигнала соответствуют их численным «эталонным» значениям на заданной скорости передачи данных. В рамках данной статьи будут найдены численные значения параметров передачи сигнала для скоростей передачи данных 25 Гбит/с.

Результаты и их обсуждение

Расчет числовых значений «эталонных» параметров передачи сигнала

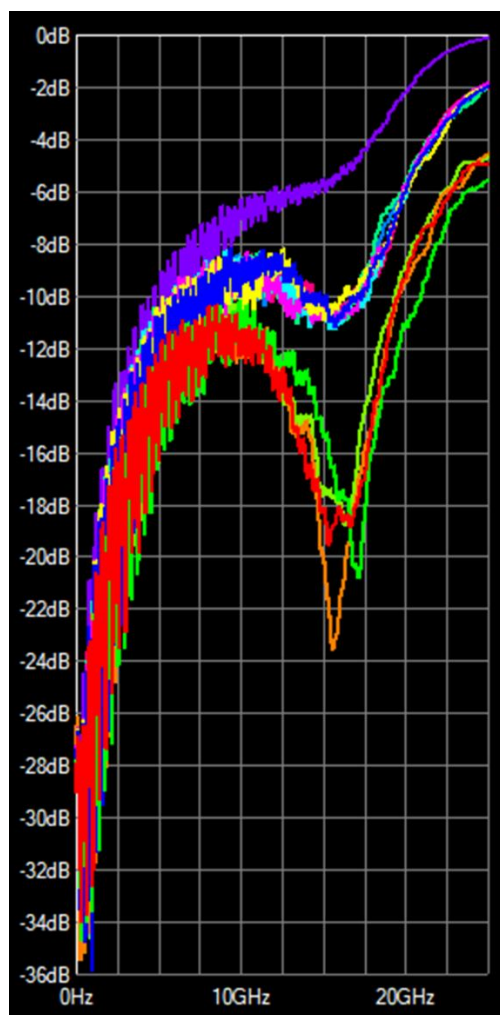
Были проанализированы 12 высокоскоростных линий передачи сигнала, соединяющие две ПЛИС внутри одной

изготовленной платы. При анализе были исключены линии, которые обладали значениями параметров, более, чем на 20% отличающимися от медианных значений. Согласно данным реальных измерений и численного моделирования методами, предлагаемыми в одной из САПР, эти линии устойчиво работают на скоростях до 25 Гбит/сек включительно.

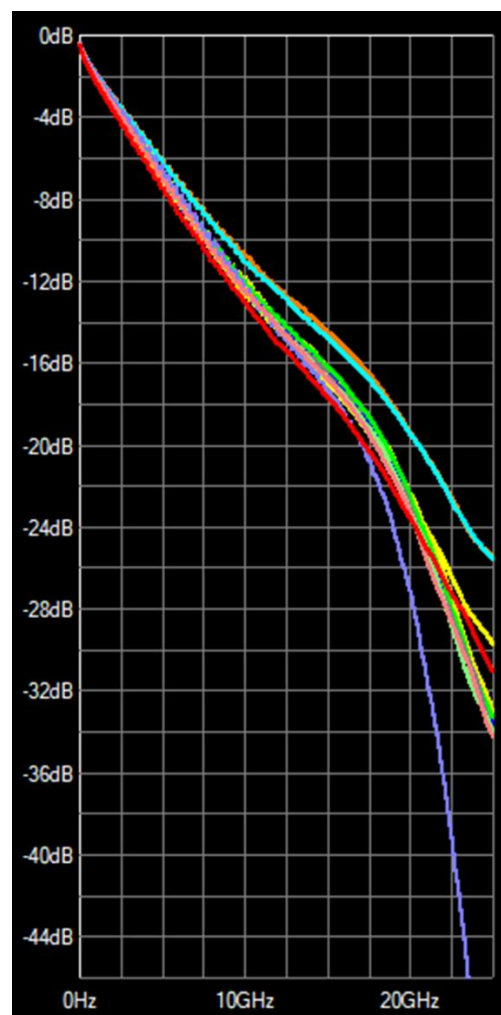
В результате проведенного моделирования и анализа были получены

численные «эталонные» диапазоны значений S-параметров передачи сигнала, при которых данная дифференциальная линия обеспечивает скорость передачи данных не менее 25 Гбит/с. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Также полученные значения S-параметров были сопоставлены с такими параметрами, как отношение сигнал-шум и «глазовой» диаграммой, а также реально измеренными значениями BER.



а)



б)

Рис. 2. Результаты расчета S-параметров: **а** – S11, **б** – S21

Fig. 2. Results of S-parameters calculations: **a** – S11, **b** – S21

Полученные числовые значения «эталонных» параметров могут применяться для оценки высокоскоростных линий передачи сигнала, как для одиночных плат, так и для нескольких плат, объединенных в единый блок на скорости передачи данных не более 25 Гбит/с.

Расчет числовых значений «эталонных» параметров передачи сигнала

Моделирование осуществлялось с помощью инструмента SerDes Batch simulation. Численные значения «эталон-

ных» параметров были рассчитаны для скорости передачи данных 25 Гбит/с, для случая, когда данные передаются устойчиво и без ошибок между двумя ПЛИС в рамках одной платы.

При несоответствии значений метрик и конструктивных параметров их «эталонным» значениям схема и(или) топология линии должна быть изменена таким образом, чтобы значения электрических, конструктивных и параметров передачи сигнала в линии начали соответствовать «эталонным» значениям.

Таблица 1. Значения метрик (параметров) передачи сигнала для анализа высокоскоростной линии передачи данных

Table 1. Values of signal transmission metrics (parameters) for analysis of high-speed data transmission line

N параметра / Parameter N	Название параметра / Parameter name	Пропускная способность / Bandwidth	Полоса пропускания / Frequency	Значение параметра / Parameter value
1	JCOM	25 Гбит/с	0 – 25 ГГц	более 1,35 дБ
2	S11	25 Гбит/с	0 – 12,5 ГГц	лучше (отражение менее) минус 8 дБ
			0 – 25 ГГц	лучше (отражение менее) минус 2дБ
3	S21	25 Гбит/с	0 – 12,5 ГГц	от 0 до - 16 дБ
			0 – 25 ГГц	от 0 до - 35 дБ
4	BER	25 Гбит/с	0 – 25 ГГц	BER E10-9 Time, UI - не менее 0.27, Voltage, V - не менее 0.015

Выводы

По результатам проведенных исследований был предложен метод расчета параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи

сигналов. Метод разработан в рамках анализа целостности сигнала на базе расчета параметров Channel Operating Margin (COM), S-параметров и Bit Error Rate (BER).

Как показали исследования, при соблюдении «эталонных» значений электрических параметров линии наибольший вклад в искажение сигнала вносят переводные отверстия, затем слои, в которых расположена сигнальная линия, количество экранирующих полигонов между сигнальными слоями и слоями, в которых проходят цепи питания, конструктивные параметры переходных отверстий, а также длина и количество сегментов высокоскоростной линии.

Следовательно, при проектировании МПП необходимо обеспечить минимальное количество переходных отверстий и их диаметр, а длину проводников необходимо делать максимально

короткой и с минимальным количеством сегментов.

Также для скорости передачи данных менее 25 Гбит/с рекомендуется использовать не менее 1 переходного отверстия между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см² площади МПП. Рекомендуется использовать не менее 2-х переходных отверстий между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см² площади МПП, если высокоскоростная линия передачи сигнала проходит на расстоянии ближе 2,5 см от цепей питания в проекции на слой, где расположены цепи питания.

Список литературы

1. Time-Domain Channel Specification: Proposal for Backplane Channel Characteristic Sections / R. Mellitz, C. Moore, M. Dudek, M. Li, A. Ran // Meeting, San Diego, CA, 2012.
2. Common Electrical I/O (CEI) – Electrical and Jitter Interoperability agreements for 6G+ bps, 11G+ bps and 25G+ bps I/O, OIF-CEI-03.1.
3. Mellitz R., Intel, Various Topics for Computing Channel Operating Margin (COM), 2014.
4. Stephan H., Howard L., Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs, 2009.
5. Brown M. et. al. The state of IEEE 802.3bj 100 Gb/s Backplane Ethernet, DesignCon, 2014.
6. Суанов Т. А. Моделирование высокоскоростных линий передачи в многослойных печатных платах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 11 (148). Р. 186-194.
7. Описание программного обеспечения для электродинамического 3D моделирования Ansys HFSS. URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (дата обращения: 10.12.2019)

8. Horn A. Dielectric constant and loss of selected grades of Rogers high frequency circuit substrates from 1-50 GHz // Rogers Corporation Technical Report 5788. 2003.
9. Signal transmission loss due to copper surface roughness in high-frequency region / E. Liew [et al.] // Association Connecting Electronics Industries, IPC APEX EXPO, 2014: New Ideas... For New Horizons, Las Vegas. 2014.
10. Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band. / A. Artemenko [et al.] // Proceedings of 41st European Microwave Conference (EuMC), Manchester, UK. 2011. P. 838-841. [https:// doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101966](https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101966)
11. Трифоненко И. М. и др. Обзор систем сквозного проектирования печатных плат радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза, 2012. Т. 1. С. 396-399.
12. Simulation Model to Predict BER Based on S-Parameters of High-Speed Interconnects / L. Pizano-Escalante, O. Longoria-Gandara, R. Parra-Michel, F. Peña-Campos // IEEE Design & Test. 2012. Vol. 36. P. 31-39.
13. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications / O. Soykin [et al.] // Proceedings of 46th European Microwave Conference (EuMC). 2016. P. 1-4.
14. Wideband Probe-Type Waveguide-To-Microstrip Transition for 28 GHz Applications / A. Mozharovskiy [et al.] // 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain. 2018. P. 113-116.
15. Top-Layer Wideband Transition from Waveguide to Planar Differential Line for 60 GHz Applications / S. Churkin [et al.] // 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain. 2018. P. 663-666.
16. Xinfeng D. An Integrated Millimeter-Wave Broadband Microstrip-to-Waveguide Vertical Transition Suitable for Multilayer Planar Circuits // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016. Vol. 26, Iss. 11. P. 897-899. [https:// doi.org/10.1109/LMWC.2016.2614973](https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2614973)
17. Antonini G., Scogna A., Orlandi A. S-parameters characterization of through, blind, and buried via holes // IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003. Vol. 2. P. 174–184.

References

1. Mellitz R., Moore C., Dudek M., Li M., Ran A., Time-Domain Channel Specification: Proposal for Backplane Channel Characteristic Sections July 2012 Meeting, San Diego, CA, 2012.
2. Common Electrical I/O (CEI) – Electrical and Jitter Interoperability agreements for 6G+ bps, 11G+ bps and 25G+ bps I/O, OIF-CEI-03.1.
3. Mellitz R., Intel, Various Topics for Computing Channel Operating Margin (COM), 2014.

4. Stephan H., Howard L., Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs, 2009.
5. Brown M. et.al. The state of IEEE 802.3bj 100 Gb/s Backplane Ethernet, DesignCon, 2014.
6. Suanov T. Modelirovanie vysokoskorostnykh linii peredachi v mnogosloinnykh pechatnykh platakh [Modeling of high-speed transmission lines in multilayer printed circuit boards]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of the Southern Federal University. Technical science*, 2013, vol.11(148), pp. 186-194.
7. *Opisanie programmnoho obespecheniya dlya elektrodinamicheskogo 3D modelirovaniya Ansys HFSS* [Description of software for electrodynamic 3D modeling Ansys HFSS]. Available at: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (accessed 10.12.2019)
8. Horn, A. Dielectric constant and loss of selected grades of Rogers high frequency circuit substrates from 1-50 GHz. Rogers Corporation Technical Report 5788. 2003
9. Liew E. [et al.] Signal transmission loss due to copper surface roughness in high-frequency region. *Association Connecting Electronics Industries, IPC APEX EXPO*, 2014: New Ideas... For New Horizons, Las Vegas, 2014.
10. Artemenko A. [et al.] Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band. *Proceedings of 41st European Microwave Conference (EuMC)*, Manchester, UK, 2011, pp. 838-841. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101966>
11. Trifonenko I et al. Obzor sistem skvoznogo proektirovaniya pechatnykh plat radioelektronnykh sredstv [Review of systems for end-to-end design of printed circuit boards of radioelectronic facilities]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. Penza, 2012, vol. 2, pp. 396-399. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sistem-skvoznogo-proektirovaniya-pe-chatnyh-plat- \radioelektronnyh-sredstv>
12. Pizano-Escalante L., Longoria-Gandara O., Parra-Michel R., Peña-Campos F., Simulation Model to Predict BER Based on S-Parameters of High-Speed Interconnects. *IEEE Design & Test*, 2012, vol. 36, pp. 31-39.
13. Soykin O. [et al.]. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications. *Proceedings of 46th European Microwave Conference (EuMC)*, 2016, pp. 1-4.
14. Mozharovskiy A. [et al.]. Wideband Probe-Type Waveguide-To-Microstrip Transition for 28 GHz Applications. *48th European Microwave Conference (EuMC)*. Madrid, Spain, 2018, pp. 113-116.
15. Churkin S. [et al.]. Top-Layer Wideband Transition from Waveguide to Planar Differential Line for 60 GHz Applications. *48th European Microwave Conference (EuMC)*. Madrid, Spain, 2018, pp. 663-666.

16. Xinfeng D. An Integrated Millimeter-Wave Broadband Microstrip-to-Waveguide Vertical Transition Suitable for Multilayer Planar Circuits. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, Iss. 11, pp. 897-899. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2614973>

17. Antonini G., Scogna A., Orlandi A. S-parameters characterization of through, blind, and buried via holes. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, vol. 2, pp. 174–184.

Информация об авторе / Information about the Author

Орда-Жигулина Марина Владимировна,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, Федеральный
исследовательский центр Южный научный
центр Российской академии наук;
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
ООО «Научно-исследовательский центр
супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»,
г. Таганрог, Российская Федерация,
e-mail: jigulina@mail.ru

Marina V. Orda-Zhigulina, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Researcher,
Supercomputers and Neurocomputers,
Southern Scientific Center of the RAS,
Rostov-on-Don, Russian Federation,
Supercomputers and Neurocomputers
Research Center,
Taganrog, Russian Federation
e-mail: jigulina@mail.ru



11 декабря 2021 г. исполняется 75 лет, члену редакционного совета журнала «Известия Юго-Западного государственного университета», доктору технических наук, профессору, действительному члену Академии наук авиации и воздухоплавания, Латыпову Рашиту Абдулхаковичу.

После обучения в средней школе и службы в Советской армии поступил в Московский вечерний металлургический институт, который окончил в 1975 году с присвоением квалификации «Инженер-металлург» по специальности «Металлургия и технология сварочного производства». После окончания института работал на кафедре металлургии сварочных процессов в Московском вечернем металлургическом институте сначала инженером, затем младшим и старшим научным сотрудником. В 1983 г. закончил заочную аспирантуру МВМИ и здесь же защитил кандидатскую диссертацию, а в 2007 г. – докторскую диссертацию.

В 1988 г. по просьбе ВНПО "Ремдеталь" (ГОСНИТИ) был переведен туда на должность заведующего лабораторией перспективных технологий и оборудования для

восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники методами сварки, наплавки и родственными процессами, где проработал до 2005 г. В этот период научная деятельность Р.А. Латыпова посвящена разработке оборудования, теоретической и практической реализации методов сварки давлением, упрочнения и реновации деталей сваркой, наплавкой и газотермическими способами напыления. В 2005 г. вернулся в Московский государственный вечерний металлургический институт, где работал доцентом кафедры «Металлургия сварочных процессов», затем заведующим этой же кафедры, деканом факультета автоматизации, технологий и оборудования. В 2009 г. ему было присвоено ученое звание профессора по кафедре «Металлургия сварочных процессов».

В Московском политехническом университете работает со дня его основания – являлся заведующим кафедрами «Металлургия сварочных процессов», «Технология и оборудование металлургических процессов», «Оборудование и технологии сварочного производства». В настоящее время Р.А. Латыпов – профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства Московского политехнического университета.

За время работы в МВМИ, ВНПО "Ремдеталь" (ГОСНИТИ), Московском политехническом университете при его непосредственном участии или под его научным руководством выполнено более семидесяти научно-исследовательских хоздоговорных и бюджетных работ. Он являлся исполнителем и ответственным исполнителем ряда работ по совершенствованию технологии соединения титана и его сплавов, металлов и керамики, жаропрочных сплавов нового поколения сваркой давлением примени-

тельно к конструкциям летательных аппаратов различного назначения, проводимых с заводами "Опыт" и "Салют", НИИ "Фонон", ВИАМ, ВНИИКП, научным руководителем работ по созданию перспективных технологий и оборудования для реновации и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники и их внедрения на ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса.

Латыпов Р.А. создал инновационные учебные курсы: Технология и оборудование сварки плавлением; Гибридные технологии в сварочном производстве; Технология и оборудование упрочнения и восстановления деталей методами сварки, наплавки и родственными процессами; Инновационные и ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве; Прогнозирование и управление свойствами сварных соединений.

Глубокие знания и междисциплинарный опыт многолетней работы позволили создать свою научную школу. Под руководством и при консультации Р.А. Латыпова выполнено 8 кандидатских и 3 докторских диссертации, подготовлено более 180 дипломированных инженеров, бакалавров и магистров.

Латыпов Р.А. является членом диссертационных советов при Московском авиационном институте и Юго-Западном государственном университете, членом редакционного совета журнала «Известия Юго-Западного государственного университета», членом редакционных коллегий научно-технических журналов «Международный технико-экономический журнал» и «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии», научным редактором журнала «Техника и технологии: теория и практи-

ка», председателем ГАК по направлениям «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении», «Модернизация и инновация оборудования и технологий в машиностроении», «Машиностроение» кафедры МТ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана, членом ГАК по направлению «Технологии материалов» кафедры ОМД НИТУ «МИСиС».

Латыпов Р.А. является признанным специалистом в области сварки, наплавки, материаловедения и родственных технологий. Основные результаты научных и прикладных работ изложены в 425 трудах, в том числе 22 авторских свидетельствах СССР и патентах РФ, 17 монографиях, 3 учебниках и 12 учебных пособиях.

Латыпов Р.А. входит в топ 100 самых продуктивных и цитируемых ученых России в областях: машиностроение, металлургия, общие и комплексные проблемы технических и прикладных наук и отраслей народного хозяйства. Награжден бронзовой медалью ВДНХ СССР, пятью медалями Всероссийского выставочного центра, золотой и серебряной медалью международной выставки «Металл-экспо», двумя дипломами отраслевых выставок за достижения в области сварки и наплавки.

Дни своего 75-летнего юбилея Р.А. Латыпов встречает высокой творческой и публикационной активностью, стремлением достигнуть инновационных научных результатов, а также пополнить число учеников и последователей.

Уважаемый Рашит Абдулхакович, поздравляем Вас с юбилеем!

Желаем крепкого здоровья, счастья, благополучия Вам и Вашим близким и дальнейших научных и творческих успехов!