

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 24 № 3 / 2020



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 24 № 3 / 2020



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadno 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, 2020



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

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

Периодичность: выходит ежеквартально

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 30.06.2020. Формат 60х84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 22,6.
Тираж 1000 экз. Заказ 25.

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);

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

Founder and Publisher:
"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

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

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str. 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 41219

in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2020



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

Singed to print 30.06.2020. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 22,6.

Circulation 1000 copies. Order 25.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Методика исследования износа резьбы бурильных труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой	8
<i>Яхимович В. А., Бреки А. Д., Альхименко А. А., Куракин М. К., Ляшенко Д. В., Агеев Е. В., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е.</i>	
Алгоритм преодоления ползающим роботом лестничного пролета путем заполнения на него или сползания	21
<i>Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В.</i>	
Адаптивное управление нелинейным объектом типа конвертоплан в условиях неопределенностей	35
<i>Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Андрес Сантьяго Мартинез Леон, Луис Мигель Москера Морочо</i>	
Безабразивная доводка сопрягаемых поверхностей деталей машин комбинированными методами с наложением электромагнитных полей	51
<i>Смоленцев Е. В., Кондратьев М. В., Павлов Е. В., Куц В. В.</i>	
Моделирование экзоскелета с гибридным линейным гравитационным компенсатором.....	66
<i>Карлов А.Е., Постольный А.А., Федоров А.В., Яцун С.Ф.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Определение границы сжимаемой толщи при проведении инженерных изысканий	79
<i>Дубракова К.О., Солодилова В.А.</i>	
Исследование влияния срока хранения древесины сосны на выносливость при сжатии вдоль волокон	88
<i>Масалов А. В., Солодилова В. А.</i>	
Аэродинамика и теплообмен закрученного потока природного газа в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта	99
<i>Григорова Н. П., Монастырев П. В., Пахомова Е. Г., Семичева Н. Е.</i>	
Анализ линейчатых поверхностей строительных конструкций	111
<i>Волкова С.Н., Шлеенко А.В., Морозова В.В., Сивак Е.Е.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Метод и алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара	121
<i>Чернецкая И.Е., Спевакова С.В., Применко Д.В.</i>	
Бифуркационный анализ кусочно-гладких бимодальных отображений с помощью нормальной формы	137
<i>Жусубалиев Ж. Т., Кузьмина Д. С., Яночкина О. О.</i>	
Устойчивость колебаний импульсной системы управления электроприводом.....	152
<i>Яночкина О.О., Болдырева Е.О.</i>	
К расчету инвариантных многообразий кусочно-гладких отображений	166
<i>Жусубалиев Ж. Т., Рубанов В. Г., Гольцов Ю. А.</i>	
Фильтрация сигнала в нечетком фильтре на основе метода отношения площадей.....	183
<i>Бобырь М. В., Лунева М. Ю.</i>	

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Methodology for Studying the Wear of Drill Pipe Threads during Repeated Making up and Holding under Load	8
<i>Yakhimovich V. A., Breki A.B., Alkhimenko A. A., Kurakin M. K., Lyashenko D.V., Ageev E. V., Kutepov S. N., Gvozdev A. E.</i>	
An Algorithm for Crawling Robot Climbing or Descending Stair Flights	21
<i>Vorocheva L. Yu., Savin S. I., Mal'chikov A. V.</i>	
Adaptive Control of a Nonlinear Convertiplane under Conditions of Uncertainty.....	35
<i>Yatsun S. F., Emelyanova O. V., Andres Santiago Martinez Leon, Luis Miguel Mosquera Morcho</i>	
Non-abrasive Finishing of Mating Surfaces of Machine Parts Using Mixed Techniques with Electromagnetic Fields Application	51
<i>Smolentsev E. V., Kondratev M. V., Pavlov E. V., Kuts V. V.</i>	
Simulation of an Exoskeleton with a Hybrid Linear Gravity Compensator.....	66
<i>Karlov A. E., Postolny A. A., Fedorov A. V., Jatsun S. F.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Determination of the Boundaries of the Compressible Strata When Conducting Engineering Surveys	79
<i>Dubrakova K. O., Solodilova V. A.</i>	
Study of the Influence of Pine Wood Shelf Life on Endurance under Compression along the Grains	88
<i>Masalov A. V., Solodilova V. A.</i>	
Aerodynamics and Heat Transfer of Swirling Natural Gas Flow in a Vortex Heat Exchanger of the Heating System of a Gas Control Point	99
<i>Grigorova N. P., Monastirev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E.</i>	
Analysis of Linear Surfaces of Building Structures	111
<i>Volkova S.N., Shleenko A. V., Morozova V. V., Sivak E. E.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Method and Algorithm for Recognition Dynamic Objects from a Mobile Platform, from Images Obtained in Different Spectral Ranges and Lidar Data	121
<i>Cherneckaya I. E., Spevakova S. V., Primenko D. V.</i>	
Bifurcation Analysis of Piecewise Smooth Bimodal Maps Using Normal Form.....	137
<i>Zhusubaliyev Z. T., Kuzmina D. S., Yanochkina O. O.</i>	
Vibration Stability of the Impulse System of the Electric Drive Control	152
<i>Yanochkina O. O., Boldyreva E. O.</i>	
Calculation of Invariant Manifolds of Piecewise-Smooth Maps	166
<i>Zhusubaliyev Z. T., Rubanov V. G., Gol'tsov Yu. A.</i>	
Filtering a Signal in a Fuzzy Filter Based on the Area Ratio Method.....	183
<i>Bobyry M. V., Luneva M. Yu.</i>	

Методика исследования износа резьбы бурильных труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой

В. А. Яхимович¹, А. Д. Бреки¹, А. А. Альхименко¹, М. К. Куракин¹,
Д. В. Ляшенко¹, Е. В. Агеев² ✉, С. Н. Кутепов³, А. Е. Гвоздев³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

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

³ Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка методики исследования износа резьбы бурильных труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой.

Методы. Для исследований используется стенд ИРС-1, который представляет собой устройство для создания крутящего момента до 80 кНм и передачи его на свинчиваемую трубу. Стенд оснащен датчиком момента свинчивания и системой управления, реализующей свинчивание до достижения заданного момента затяжки или периодическое приложение момента к свинченной резьбовой паре. Методика испытаний с использованием стенда ИРС-1 представляет собой последовательность действий: перед началом испытаний удаляются резьбовые протекторы; резьбы на ниппеле и втулке очищаются от консервационной смазки и следов коррозии сухим протиранием и последующим обезжириванием; резьба на ниппеле обмеряется согласно карте замеров с помощью калибра. Калибр изготовлен на основе отпечатка резьбовой поверхности и представляет собой пластинку с вырезами в форме поперечного сечения четырех ниток резьбы. Зазор между калибром и резьбой измеряется с помощью набора щупов: от 0,01 до 0,09 мм – с шагом 0,01 мм, свыше 0,1 мм до 0,45 мм – с шагом 0,05 мм, свыше 0,5 мм до 1 мм – с шагом 0,1 мм.

Результаты. Спроектирован и создан новый триботехнический стенд модели ИРС-1, позволяющий реализовывать различные методики исследования износа резьбы бурильных труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой. Важной особенностью спроектированного стенда является его оснащение датчиком момента свинчивания и системой управления, реализующей свинчивание до достижения заданного момента затяжки или периодическое приложение момента к свинченной резьбовой паре. Максимальный крутящий момент, создаваемый стендом, составляет 80 кНм. Разработана частная методика, включающая в себя требования стандарта API 7G-2 и показавшая свою эффективность при исследовании износа

резьбы стальных буровых труб. Для реализации методики разработан специальный калибр, изготовленный на основе отпечатка резьбовой поверхности и представляющий собой пластинку с вырезами в форме поперечного сечения четырех ниток резьбы. В границах методики разработана карта замеров с двумя выделенными областями измерений. Создан алгоритм свинчивания трубы с равномерной скоростью, включающий в себя три этапа. Разработан алгоритм измерений с использованием реперных меток, при использовании которого реализуются замеры в четырех точках каждой выделенной области.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки слитковых, порошковых и нанокмпозиционных материалов с различной дисперсностью фазовых и структурных составляющих, эксплуатируемых в экстремальных условиях и состояниях.

Ключевые слова: износ; буровая труба; резьбовое соединение; свинчивание; смазочный материал; трение; буровая техника.

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

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение от 17.11.2020 № 075-15-2020-934).

Для цитирования: Методика исследования износа резьбы буровых труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой / В. А. Яхимович, А. Д. Бреки, А. А. Альхименко, М. К. Куракин, Д. В. Ляшенко, Е. В. Агеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 8-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-8-20>.

Поступила в редакцию 15.04.2020

Подписана в печать 26.05.2020

Опубликована 30.06.2020

Methodology for Studying the Wear of Drill Pipe Threads during Repeated Making up and Holding under Load

Valeriy A. Yakhimovich¹, Aleksandr B. Breki¹, Aleksey A. Alkhimenko¹,
Maksim K. Kurakin¹, Daniil V. Lyashenko¹, Evgeniy V. Ageev² ✉,
Sergey N. Kutepov³, Aleksandr E. Gvozdev³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya str., Saint Petersburg 195251, Russian Federation

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

³ Tula State Pedagogical University named after L.N.Tolstoy
125 Tula ave., Tula 300026, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a methodology for studying the wear of drill pipe threads during repeated making up and holding under load.

Methods. For the research, stand "IRS-1" was used. This stand is a device for creating a torque of up to 80 kNm and transferring it to a made-up pipe. It is equipped with a make-up torque sensor and a control system that performs

make-up until the specified tightening torque is achieved or periodically applies the torque to the made-up thread pair. The test procedure for IRS-1 stand consists of the following sequence of actions: before starting the tests, the threaded protectors are removed; the threads on the nipple and sleeve are cleaned of the preservative grease and traces of corrosion by dry wiping and subsequent degreasing; the thread on the nipple is measured according to the measurement chart using a gauge. The gauge is made on the basis of the threaded surface impression and is a plate with cutouts in the form of a cross-section of four threads. The gap between the gauge and the thread is measured using a set of probes from 0.01 to 0.09 mm in increments of 0.01 mm, over 0.1 mm to 0.45 mm in increments of 0.05 mm, over 0.5 mm to 1 mm in increments of 0.1 mm.

Results. A new tribotechnical stand of IRS-1 model was designed and created, which allows implementing various techniques for studying the wear of drill pipe threads during repeated making-up and holding under load. An important feature of the designed stand is a make-up torque sensor and a control system that perform make-up until the specified tightening torque is achieved or periodically applies the torque to the made-up threaded pair. The maximum torque generated by the stand is 80 kNm. A particular technique was developed. The technique includes the requirements of the API 7G-2 standard and has shown its effectiveness in the study of thread wear of steel drill pipes. To implement the technique, a special gauge was developed on the basis of the threaded surface impression and is a plate with cutouts in the form of a cross-section of four threads. Within this technique, a measurement chart with two selected measurement areas was developed. An algorithm for making up a pipe at a uniform speed was created. The algorithm includes three stages. There was developed an algorithm of measurements using reference marks, providing measurements at four points in each selected area.

Conclusion. The results obtained can be used to create resource-saving technologies for processing ingot, powder, and nanocomposite materials with different dispersion of phase and structural components that are operated under extreme conditions and states.

Keywords: wear; drill pipe; threaded joint; making-up; grease; friction; drilling equipment.

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 Ministry of education and science of Russia as part of the program of the world-class Scientific center in the direction of "Advanced digital technologies" of Spbpu (agreement No. 075-15-2020-934 of 17.11.2020).

For citation: Yakhimovich V. A., Breki A. B., Alkhimenko A. A., Kurakin M. K., Lyashenko D. V., Ageev E. V., Kutevov S. N., Gvozdev A. E. Methodology for Studying the Wear of Drill Pipe Threads during Repeated Making up and Holding under Load // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-8-20>.

Received 15.04.2020

Accepted 26.05.2020

Published 30.06.2020

Введение

В нефтепромысловом оборудовании бурильные трубы существенно влияют на технические и экономические показатели строительства различных скважин. В свою очередь, эффективность функционирования бурильных труб существенно зависит от качества и надежности замкового резьбового соединения [1]. Известно [2], что приме-

нительно к буровой технике, коническое резьбовое соединение имеет существенные преимущества по сравнению с цилиндрической резьбой. Прежде всего, это возможность создания в сопряжении относительно простым способом желаемой напряженной посадки, а также более качественное центрирование свинчиваемых деталей и быстрота сборки. В связи с этим коническая резьба широко использовалась и до настоящего времени

применяется в нефтепромысловой и буровой технике [2]. В процессе работы существенное значение играют эксплуатационные характеристики и герметичность резьбовых соединений буровых труб [3, 4]. При многократном свинчивании происходит процесс трения и сопутствующий процесс изнашивания резьбы, в результате чего снижается надёжность работы [5]. В связи с этим, возникает необходимость разработки новых перспективных материалов для создания буровых труб¹ [6-8], с одной стороны, и методик стендовых испытаний резьбовых соединений на

стойкость к износу при многократном свинчивании – с другой.

Целью настоящей работы является разработка методики исследования износа резьбы буровых труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой.

Материалы и методы

Для исследований используется стенд ИРС-1, спроектированный в научно-технологическом комплексе «Новые технологии и материалы» ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого» (рис. 1).

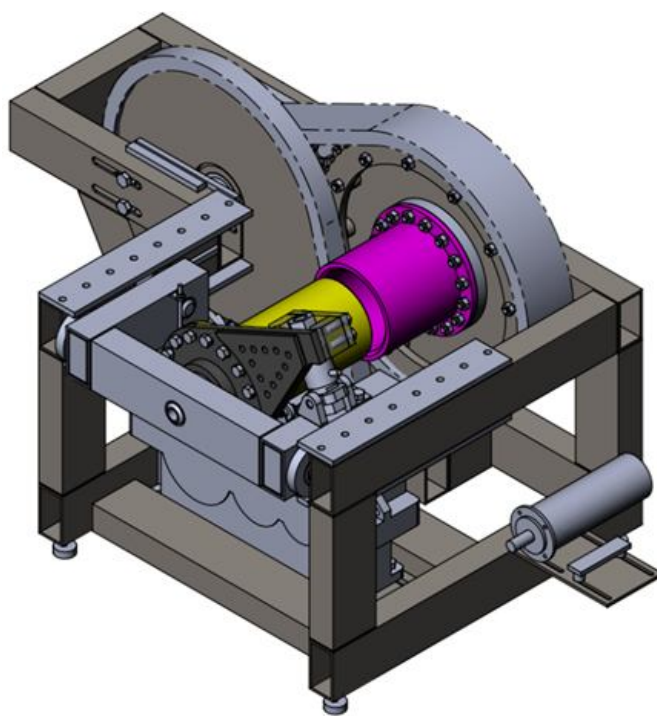


Рис. 1. Стенд для исследования износа резьбы буровых труб модели ИРС-1

Fig. 1. Stand IRS-1 for the study of thread wear of drill pipes

Испытательный стенд ИРС-1 – устройство для создания крутящего момен-

та до 80 кН·м и передачи его на свинчиваемую трубу. Стенд оснащен датчиком момента свинчивания и системой управления, реализующей свинчивание до достижения заданного момента за-

¹ Иванова А.В. Повышение эксплуатационных характеристик трубных резьбовых конструкций, изготовленных из высокопрочных алюминиевых сплавов: автореф. дис... канд. техн. наук. Самара, 2013. 16 с.

тяжки или периодическое приложение момента к свинченной резьбовой паре.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты с использованием стенда ИРС-1 были получены в следующей последовательности:

1. Перед началом испытаний удаляются резьбовые протекторы.

2. Резьбы на ниппеле и втулке очищаются от консервационной смазки и следов коррозии сухим протиранием и последующим обезжириванием.

3. Резьба на ниппеле обмеряется согласно карте замеров (рис. 2) с помощью калибра.

Калибр изготовлен на основе отпечатка резьбовой поверхности и представляет собой пластинку с вырезами в форме поперечного сечения четырех ниток резьбы. Зазор между калибром и резьбой измеряется с помощью набора щупов: от

0,01 до 0,09 мм – с шагом 0,01 мм; свыше 0,1 мм до 0,45 мм – с шагом 0,05 мм; свыше 0,5 мм до 1 мм – с шагом 0,1 мм.

4. Проводится визуальный осмотр резьбы на наличие дефектов, забоин и деформации витков.

5. Установленная на стенд труба вручную плавно водится в зацепление с муфтой и предварительно свинчивается на несколько оборотов резьбы на малой скорости (общий вид стенда с трубой приведен на рис. 3).

6. Дальнейшее свинчивание производится в автоматическом режиме в соответствии со следующим алгоритмом:

- свинчивание до момента 2 кН·м на мощностном режиме двигателя 100%;

- свинчивание до момента 20 кН·м на режиме 30 %;

- свинчивание до момента 49 кН·м на режиме 10 %.

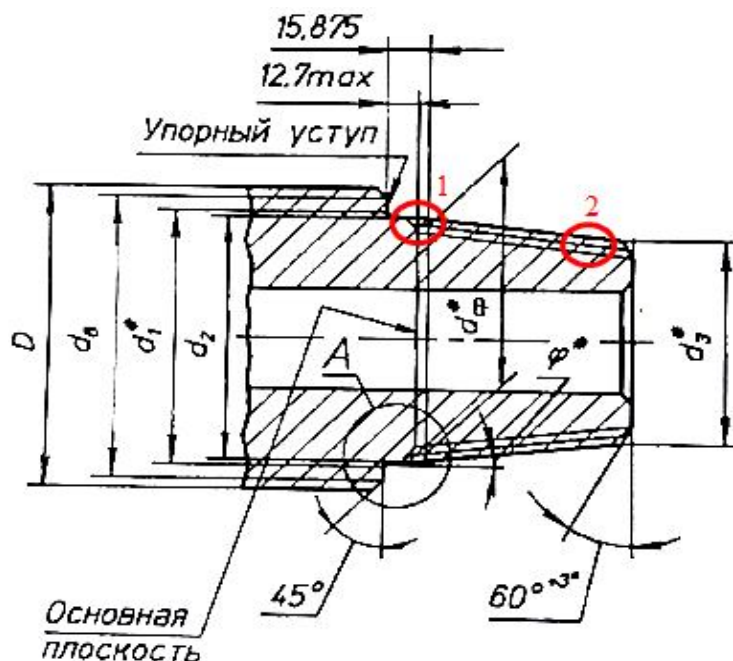


Рис. 2. Области замеров резьбы

Fig. 2. Thread measurement areas

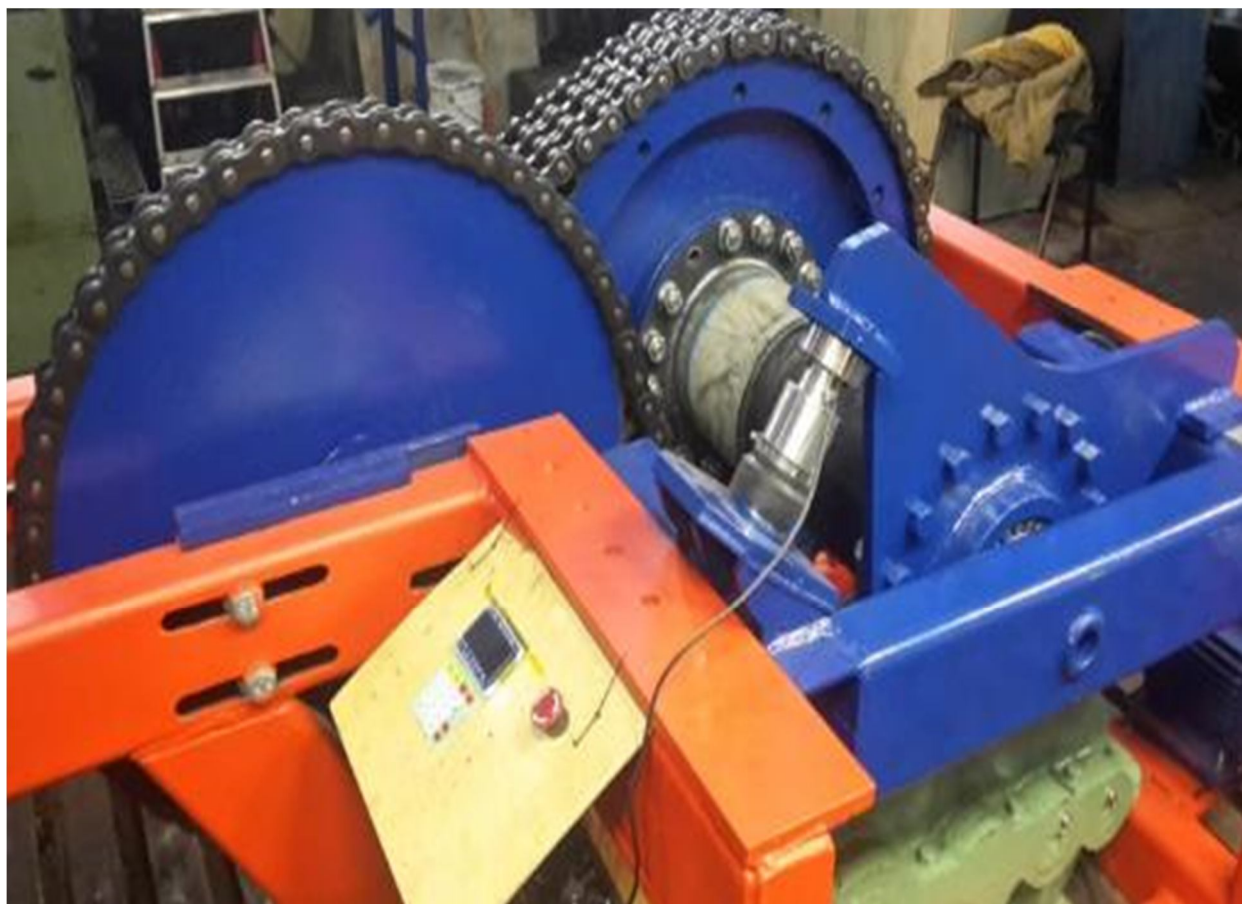


Рис. 3. Общий вид станда ИРС-1 в процессе свинчивания трубы

Fig. 3. General view of IRS-1 stand in the process of pipe making up

7. Свинчивание происходит с равномерной скоростью, причём, после свинчивания наносятся две пары меток на муфте и ниппеле (рис. 4).

8. После выдержки пары при моменте 57 кНм в течение часа замеряется смещение реперных меток, а далее пара ниппель-муфта свинчивается до момента 62 кНм. После последней операции вновь замеряется смещение реперных меток.

9. Далее пара выдерживается в течение 30 минут и развинчивается, после чего очищается от смазки для осмотра и измерений.

10. В процессе осмотра выявляется наличие задиров, оценивается износ резь-

бы и степень адгезии смазочного материала.

11. Свинчивание в соответствии с пунктами методики 1-10 повторяется в количестве, необходимом для хорошей статистики.

12. После окончания пятого и десятого циклов производятся обмеры резьбы, результаты которых заносятся в табл. 1. Измерения проводятся в областях 1 и 2 (см. рис. 2). Всего проводится по три набора измерений в каждой области, при этом в каждом наборе фиксируются замеры при углах 0, 90, 180 и 270° относительно реперной метки, показанной на рис.4.



Рис. 4. Метки, нанесенные на свинченные в первый раз трубы

Fig. 4. Marks applied to first-time made up pipes

Таблица 1. Максимальный измеренный зазор, мм

Table 1. Maximum measured gap, mm

Замер / Measuring	Область замеров 1 / Measurement area 1				Область замеров 2 / Measurement area 2			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
1	$d_{1,1,1}$	$d_{1,1,2}$	$d_{1,1,3}$	$d_{1,1,4}$	$d_{2,1,1}$	$d_{2,1,2}$	$d_{2,1,3}$	$d_{2,1,4}$
2	$d_{1,2,1}$	$d_{1,2,2}$	$d_{1,2,3}$	$d_{1,2,4}$	$d_{2,2,1}$	$d_{2,2,2}$	$d_{2,2,3}$	$d_{2,2,4}$
3	$d_{1,3,1}$	$d_{1,3,2}$	$d_{1,3,3}$	$d_{1,3,4}$	$d_{2,3,1}$	$d_{2,3,2}$	$d_{2,3,3}$	$d_{2,3,4}$
Износ	$\Delta d_{1,0}$	$\Delta d_{1,90}$	$\Delta d_{1,180}$	$\Delta d_{1,270}$	$\Delta d_{2,0}$	$\Delta d_{2,90}$	$\Delta d_{2,180}$	$\Delta d_{2,270}$

Замер 1 осуществляется перед началом испытаний, замер 2 после пятого свинчивания, замер 3 после десятого свинчивания, строка 4 – износ резьбы за время испытаний (разница между замером 3 и замером 1).

Полученные данные по значению износа сравниваются с максимально до-

пустимым его значением в соответствии со стандартом API 7G-2, в результате чего устанавливается соответствие резьбового соединения требованиям данного стандарта. Эти сведения в дальнейшем используются при проектировании изделий, эксплуатируемых в экстремальных условиях и состояниях [10-22].

Выводы

В процессе проделанной работы получены следующие основные результаты:

1. Спроектирован и создан новый трибологический стенд модели ИРС-1, позволяющий реализовывать различные методики исследования износа резьбы буровых труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой.

2. Разработана частная методика исследования износа резьбы буровых труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой.

3. Созданная методика показала свою эффективность при исследовании износа резьбы стальных буровых труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой.

4. Разработанная частная методика включает в себя требования стандарта API 7G-2.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки слитковых, порошковых и нанокомпозиционных материалов с различной дисперсностью фазовых и структурных составляющих, эксплуатируемых в экстремальных условиях и состояниях.

Список литературы

1. Семин В.И. Применение современных методик проектирования резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2012. № 7. С. 6-9.

2. Семин В.И. Совершенствование конструкций резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента и забойных двигателей // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2013. № 1. С. 33-37.

3. Басович В.С., Буяновский И.Н., Петункин И.В. Влияние момента крепления замковых соединений на эксплуатационные характеристики алюминиевых буровых труб // Бурение и нефть. 2016. № 4. С. 42-47.

4. Мукашев Н.Б. Герметичность резьбовых соединений буровых труб // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2013: материалы XIV международной молодежной научной конференции: в 5 ч. Ухта, 2013. С. 122-125.

5. Кузьминых Д.В. Совершенствование методов повышения долговечности замкового соединения буровой колонны при многократном свинчивании // Севергеоэко-тех-2011: материалы XII международной молодежной научной конференции: в 5 ч. Ухта, 2011. С. 140-145.

6. Вахрушев А.В. Высокомомментные резьбовые соединения буровых труб. Опыт применения // Нефть. Газ. Новации. 2014. № 11 (190). С. 17-20.

7. Семин В.И. Поверхностное упрочнение замковой резьбы методом карбонитрации // Нефтяное хозяйство. 2004. № 12. С. 104-106.
8. Пат. 2624274 Российская Федерация, МПК C21D 1/09, B23K 26/352. Способ обработки резьбового соединения бурильных труб из титановых сплавов / Астахов А.А., Никитин А.В., Дмитров А.И., Селюта П.П.; заявитель и патентообладатель «АО Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин». №2015149445; заявл. 17.11.2015; опубл. 03.07.2017. Бюл. № 19.
9. Investigation of the pivoting friction of shkh15 steel over R6M5 and 10R6M5-MP steel with the use of mathematical modeling / A.D. Breki, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. № 4. P. 927-932.
10. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Semiempirical mathematical models of the pivoting friction of SHKh15 steel over R6M5 steel according to the ball-plane scheme with consideration of wear // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. № 4. P. 1008-1013.
11. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Обработка сталей и сплавов в интервале температур фазовых превращений. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 320 с.
12. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.
13. Mechanism of the hydrogen cracking of metals and alloys, part I (review) / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. № 1. P. 24-31.
14. Mechanism of the hydrogen cracking of metals and alloys, part II (review) / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. № 1. P. 32-41.
15. Гвоздев А.Е. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах. 2-е изд., исправ. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 477 с.
16. Физико-механические и коррозионные свойства металлических материалов, эксплуатируемых в агрессивных средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, М.В. Ушаков, В.В. Извольский. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 553 с.
17. Пат. 2707374 Российская Федерация, МПК B23K 26/38. Способ формирования упрочненного поверхностного слоя в зоне лазерной резки деталей из легированных конструкционных сталей / Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Колмаков А.Г., Кутепов С.Н., Малий Д.В., Голышев И.В.; заявитель и патентообладатель ООО «МЕТАЛЛИКА71». № 2019115250; заявл. 17.05.2019; опубл. 26.11.2019. Бюл. № 33.
18. Пат. № 2695715 Российская Федерация, МПК B23K26/38. Способ формирования упрочненного приповерхностного слоя в зоне лазерной резки деталей / Минаев И.В.,

Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Алявдина Е.С.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ТЕЛАР». № 2018140047; заявл. 14.11.2018; опубл. 25.07.2019. Бюл. № 21.

19. Исследование производительности процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Н.А. Пивовар // Известия Курского государственного технического университета. 2010. № 4 (33). С. 76-82.

20. Использование твердосплавных электроэрозионных порошков для получения износостойких покрытий при восстановлении и упрочнении деталей машин и инструмента / Е.В. Агеев, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева, А.С. Бондарев, Е.П. Новиков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 1. С. 32-38.

21. Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, Гвоздев А.Е. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3 (16). С. 17-23.

References

1. Semin V.I. *Primenenie sovremennykh metodik proektirovaniya rez'bovykh soedinenii trub neftegazovogo sortamenta* [Application of modern methods for designing threaded connections of oil and gas pipes]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more = Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*, 2012, no. 7, pp. 6-9 (In Russ.).

2. Semin V.I. *Sovershenstvovanie konstruktsii rez'bovykh soedinenii trub neftegazovogo sortamenta i zaboinykh dvigatelei* [Improving the design of threaded connections of oil and gas pipes and downhole engines]. *Vestnik Assotsiatsii burovykh podryadchikov = Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2013, no. 1, pp. 33-37 (In Russ.).

3. Basovich V.S., Buyanovsky I.N., Petunkin I.V. *Vliyanie momenta krepneniya zamkovykh soedinenii na ekspluatatsionnye kharakteristiki alyuminievykh buril'nykh trub* [Influence of the moment of fastening of lock connections on the performance characteristics of aluminum drill pipes]. *Burenie i nef't = Drilling and Oil*, 2016, no. 4, pp. 42-47 (In Russ.).

4. Mukashev N.B. [Tightness of threaded connections of drill pipes]. *SEVERGEOEKOTEKh-2013. Materialy XIV mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii*. [SEVERGEOEKOTEKh-2013. Materials of the XIV international youth scientific conference]. Ukhta, 2013, pp. 122-125 (In Russ.).

5. Kuzminykh D.V. [Improvement of methods for increasing the durability of the lock connection of the drill string during multiple screwing]. *Severgeokotekh-2011. Materialy XII mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Severgeokotekh-2011. Materials of the XII international youth scientific conference]. Ukhta, 2011, pp. 140-145 (In Russ.).
6. Vakhrushev A.V. Vysokomomentnye rez'bovye soedineniya buril'nykh trub. Opyt primeneniya [high-Torque threaded connections of drill pipes. Experience of application]. *Neft'. Gaz. Novatsii = Oil. Gas. Innovations*, 2014, no. 11 (190), pp. 17-20 (In Russ.).
7. Semin V.I. Poverkhnostnoe uprochnenie zamkovoï rez'by metodom karbonitratsii [Surface hardening of the lock thread by carbonitration method]. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Economy*, 2004, no. 12, pp. 104-106 (In Russ.).
8. Astashov A. A., Nikitin A.V., Dmitrov A. I., Selyuta P.P. *Sposob obrabotki rez'bovogo soedineniya buril'nykh trub iz titanovykh splavov* [Method for processing threaded connections of drill pipes made of titanium alloys]. Patent RF, no. 2624274, 03.07.2017. (In Russ.).
9. Breki A.D., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Sergeev N.N. Investigation of the pivoting friction of shkh15 steel over R6M5 and 10R6M5-MP steel with the use of mathematical modeling. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10, no 4, pp. 927-932.
10. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Semiempirical mathematical models of the pivoting friction of SHKh15 steel over R6M5 steel according to the ball-plane scheme with consideration of wear. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1008-1013.
11. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E. *Obrabotka staley i splavov v intervale temperaturnykh fazovykh prevrashchenii* [Processing of steels and alloys in the temperature range of phase transformations]. Tula, Tula State University Publ., 2016. 320 p. (In Russ.).
12. Zhuravlev G.M., Gvozdev A. E. *Plasticheskaya dilatatsiya i deformatsionnaya povrezhdaemost' metallov i splavov* [Plastic dilatancy and deformational damage of metals and alloys]. Tula, Tula State University Publ., 2014. 114 p. (In Russ.).
13. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., A.G. Kolmakov Mechanism of the hydrogen cracking of metals and alloys, part I (review). *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 24-31.
14. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Mechanism of the hydrogen cracking of metals and alloys, part II (review). *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 32-41.
15. Gvozdev A. E. *Ekstremal'nye efekty prochnosti i plastichnosti v metalliche-skikh vysokolegirovannykh slitkovykh i poroshkovykh sistemakh* [Extreme effects of strength and plasticity in metal high-alloy ingot and powder systems]. Tula, Tula State University Publ., 2019. 477 p. (In Russ.).

16. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ushakov M.V., Izvol'sky V.V. *Fiziko-mekhanicheskie i korrozionnye svoystva metallicheskih materialov, ekspluatiruemyykh v agressivnykh sredakh* [Physical-mechanical and corrosion properties of metal materials operated in aggressive environments]. Tula, Tula State University Publ., 2019. 553 p. (In Russ.).

17. Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Kolmakov A. G., Kutepov S. N., Maliy D. V., Golyshev I. V. *Sposob formirovaniya uprochnennogo poverkhnostnogo sloya v zone lazernoi rezki detalei iz legirovannykh konstruksionnykh stalei* [Method for forming a hardened surface layer in the zone of laser cutting of parts made of alloyed structural steels]. Patent RF, no.2707374, 2019 (In Russ.).

18. Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Al'yavdina E. S. *Sposob formirovaniya uprochnennogo pripoverkhnostnogo sloya v zone lazernoi rezki detalei* [Method for forming a hardened near-surface layer in the zone of laser cutting of parts]. Patent RF, no. 2695715, 2019 (In Russ.).

19. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Ageeva E. V., Latypov R. A., Pivovarov N. A. *Issledovanie proizvoditel'nosti protsessa polucheniya poroshkov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya* [Research of productivity of the process of obtaining powders by the method of electroerosive dispersion]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2010, no. 4 (33), pp. 76-82 (In Russ.).

20. Ageev E. V., Davydov A. A., Ageeva E. V., Bondarev A. S., Novikov E. P. *Ispol'zovanie tverdospлавnykh elektroerozionnykh poroshkov dlya polucheniya iznosostoykikh pokrytii pri vosstanovlenii i uprochnenii detalei mashin i instrumeta* [Use of hard-alloy electroerosive powders for obtaining wear-resistant coatings when restoring and strengthening machine parts and tools]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2013, no. 1, pp. 32-38 (In Russ.).

21. Breki A.D., Tolochko O. V., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeev N. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E. *Otsenka vliyaniya zhidkogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala s nanocha-stitsami geomodifikatora na trenie v podshipnikovom uzle* [Evaluation of the influence of a liquid lubricating composite material with nanoparticles of a geomodifier on friction in a bearing unit]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2015, no. 3 (16), pp. 17-23 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яхимович Валерий Александрович, ведущий инженер научно-исследовательского и образовательного центра «Везерфорд-Политехник», ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: valera_spb@inbox.ru

Бреки Александр Джалюльевич, кандидат технических наук, доцент высшей школы машиностроения, ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: albreki@yandex.ru

Альхименко Алексей Александрович, директор научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: 9586435@mail.ru

Куракин Максим Константинович, инженер отдела по взаимодействию с оборонно-промышленным комплексом, ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kurakin@spbstu.ru

Ляшенко Даниил Владимирович, инженер научно-исследовательского и образовательного центра «Везерфорд-Политехник» ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: liashenko@spbstu.ru

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

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

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

Valeriy A. Yakhimovich, Leading Engineer of the Research and Educational Center Weatherford-Polytechnic, Peter the Great SPbPu, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: valera_spb@inbox.ru

Aleksandr D. Breki, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great SPbPu, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: albreki@yandex.ru

Aleksey A. Alkhimenko, Director of the Scientific and Technological Complex «New technologies and materials», Peter the Great SPbPu, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: 9586435@mail.ru

Maksim K. Kurakin, Engineer of the Department for Interaction with the Military-Industrial Complex, Peter the Great SPbPu, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: kurakin@spbstu.ru

Daniil V. Lyashenko, Engineer of the Research and Educational Center Weatherford-Polytechnic, Peter the Great SPbPu, Saint Petersburg, Russian Federation e-mail: liashenko@spbstu.ru

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

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Technology and service, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor, Chief Researcher, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-21-34>

Алгоритм преодоления ползающим роботом лестничного пролета путем заполнения на него или сползания

Л.Ю. Ворочаева¹ ✉, С.И. Савин², А.В. Мальчиков¹

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

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

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является разработка алгоритма последовательных движений трехзвеного ползающего робота, который обеспечивает возможность преодоления устройством лестничных пролетов путем заполнения на каждую ступень или сползания с каждой ступени при обратной последовательности этапов. Особенностью робота является сочетание трех типов движений: змее-, черве- и гусеницеподобного, что делает устройство более маневренным и расширяет его функциональные возможности.

Методы. Для разработки математической модели движения звеньев ползающего робота на каждом из этапов алгоритма и описания его контактного взаимодействия с опорной поверхностью используется метод динамики многомассовых систем, для формирования связей, ограничивающих движения звеньев, используются методы кинематического и структурного анализа механизма робота.

Результаты. В статье представлены результаты численных экспериментов заполнения робота на ступень лестничного пролета и сползания с нее, подтверждающие адекватность предложенного алгоритма движения. Положения опорных точек в моменты начала и завершения этапов, длины звеньев, а также углы их поворота в вертикальной плоскости соответствуют значениям этих величин, указанным в алгоритме в виде накладываемых связей и сформулированных условий завершения этапов.

Заключение. В статье описан детальный поэтапный алгоритм заполнения ползающего робота на ступень лестничного пролета и сползания с нее, показано, что заполнение и сползание являются противоположными с точки зрения реализации последовательности этапов операциями. Преимуществом данного алгоритма является универсальность его этапов для подъема робота по лестнице и спуска с нее. Помимо этого этапы алгоритма разработаны таким образом, что опрокидывания робота не происходит.

Ключевые слова: трехзвеновый ползающий робот; заполнение; сползание; лестничный пролет; алгоритм; этап движения.

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

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента (проект МК-200.2019.1).

Для цитирования: Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В. Алгоритм преодоления ползающим роботом лестничного пролета путем заполнения на него или сползания // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 21-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-21-34>.

Поступила в редакцию 09.04.2020

Подписана в печать 27.04.2020

Опубликована 30.06.2020

© Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., Мальчиков А.В., 2020

An Algorithm for Crawling Robot Climbing or Descending Stair Flights

Lyudmila Yu. Vorochaeva ¹ ✉, Sergey I. Savin ², Andrey V. Mal'chikov ¹

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

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

✉ e-mail: mila180888@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of this work is to develop an algorithm for sequential movements of a three-section crawling robot, which enables the device overcoming flights of stairs by crawling on each step or descending each step in the reverse sequence of stages. A special feature of the robot is the combination of three types of movement: snake-, worm - and caterpillar-like, which makes the device more maneuverable and expands its functionality.

Methods. To develop a mathematical model of the movement of crawling robot sections at each stage of the algorithm and description of its contact interaction with the surface, the method of dynamics of multi-mass systems is used; methods of kinematic and structural analysis of the robot mechanism are used to form constraints that restrict the movement of the sections.

Results. The article presents the results of simulation experiments of a robot crawling on a step of a flight of stairs and descending it, confirming the adequacy of the proposed movement algorithm. Positions of base points at the moments of the beginning and completion of the stages, section lengths and their turning angles in the vertical plane correspond to the values of these variables specified in the algorithm in the form of applied links and laid down conditions for the completion of stages.

Conclusion. The article describes a detailed step-by-step algorithm for robot crawling on a step of a stairs flight and descending it; it is shown that crawling and descending are opposite operations from the point of view of sequence of stages implementing. The advantage of this algorithm is the versatility of its stages for moving the robot up and downstairs. In addition, the algorithm stages are designed in such a way that the robot does not roll over.

Keywords: tree-section crawling robot; crawling; descending; stair flight; algorithm; movement stage.

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

Funding: The research was carried out with the support of the President Grant (project MK MK-200.2019.1).

For citation: Vorochaeva L. Yu., Savin S. I., Mal'chikov A. V. An Algorithm for Crawling Robot Climbing or Descending Stair Flights // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 21-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-21-34>.

Received 09.04.2020

Accepted 27.04.2020

Published 30.06.2020

Введение

Задача преодоления лестничного пролета робототехническими устройствами

в настоящее время является актуальной и не до конца решенной. Эта задача возникает при движении роботов внут-

ри высотных зданий, а для ее решения учеными предлагаются различные по принципам движения робототехнические системы. Наибольшее распространение получили гусеничные роботы [1-3], двуногие шагающие роботы [4-6], а также различные модификации ползающих роботов [7-14]. Следует отметить, что последние, как правило, представляют собой многомодульные системы, собранные из большого числа однотипных модулей, что приводит к сложностям с реализацией управления данными устройствами. Поэтому в данной работе решено остановиться на рассмотрении задачи преодоления одной ступени лестничного пролета трехзвенным ползающим роботом, особенностью которого является возможность сочетания гусенице-, черве- и змееподобных движений [15].

Материалы и методы

Постановка задачи исследования

Ползающий робот представляет собой трехзвенный механизм (каждое звено $i=1-3$ на рис. 1 показано в виде прямоугольника), звенья которого являются телескопическими (что обеспечивается линейными приводами, не показанными на рис. 1) и имеют длины $l_i \in [l_{\min}, l_{\max}]$, где $l_{\min}$, $l_{\max}$ – минимальное и максимальное значения длины, причем $l_{\max} = 2l_{\min}$. Каждые два звена соединены между собой двумя активными шарнирами 4 и 5, обеспечивающими повороты звеньев в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на углы φ_i (шарнир 4) и θ_i (шарнир 5). Контакт

звеньев с поверхностью может осуществляться в четырех опорных точках O_1-O_4 , коэффициент трения f_{1-4} в которых является управляемой величиной, что обеспечивается сменой контактных поверхностей, одна из которых имеет коэффициент трения $f_{\min}$ (при этом опора может скользить по поверхности), а другая – $f_{\max}$ (при нем опора неподвижна) [16, 17]. Другие варианты управления силой трения в опорах описаны в работах [18-20]. Высота опор считается крайне малой. На рис. 1 зафиксированные на поверхности опоры показаны черными треугольниками. Вектор обобщенных координат, посредством которого описывается движение робота, имеет вид:

$$q = (x_0, y_0, z_0, l_1, l_2, l_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3)^T. \quad (1)$$

Будем рассматривать движение робота в системе координат $Ax_Py_Pz_P$, связанной с лестничным пролетом, как показано на рис. 1, ось Ax_P направлена на нас, точка A является крайней точкой преодолеваемой ступени. Пусть лестничный пролет состоит из P -го числа ступеней, длина (вдоль оси Ax_P), ширина (вдоль оси Ay_P) и высота (вдоль оси Az_P) каждой ступени равны l_P , b_P и h_P соответственно.

Алгоритм преодоления ступени лестничного пролета

В работе предложен универсальный алгоритм, позволяющий роботу как заползть на ступень пролета, так и сползть с нее (при обратной последовательности этапов), показанный на рис. 1 в виде положений робота в моменты начала и завершения этапов.

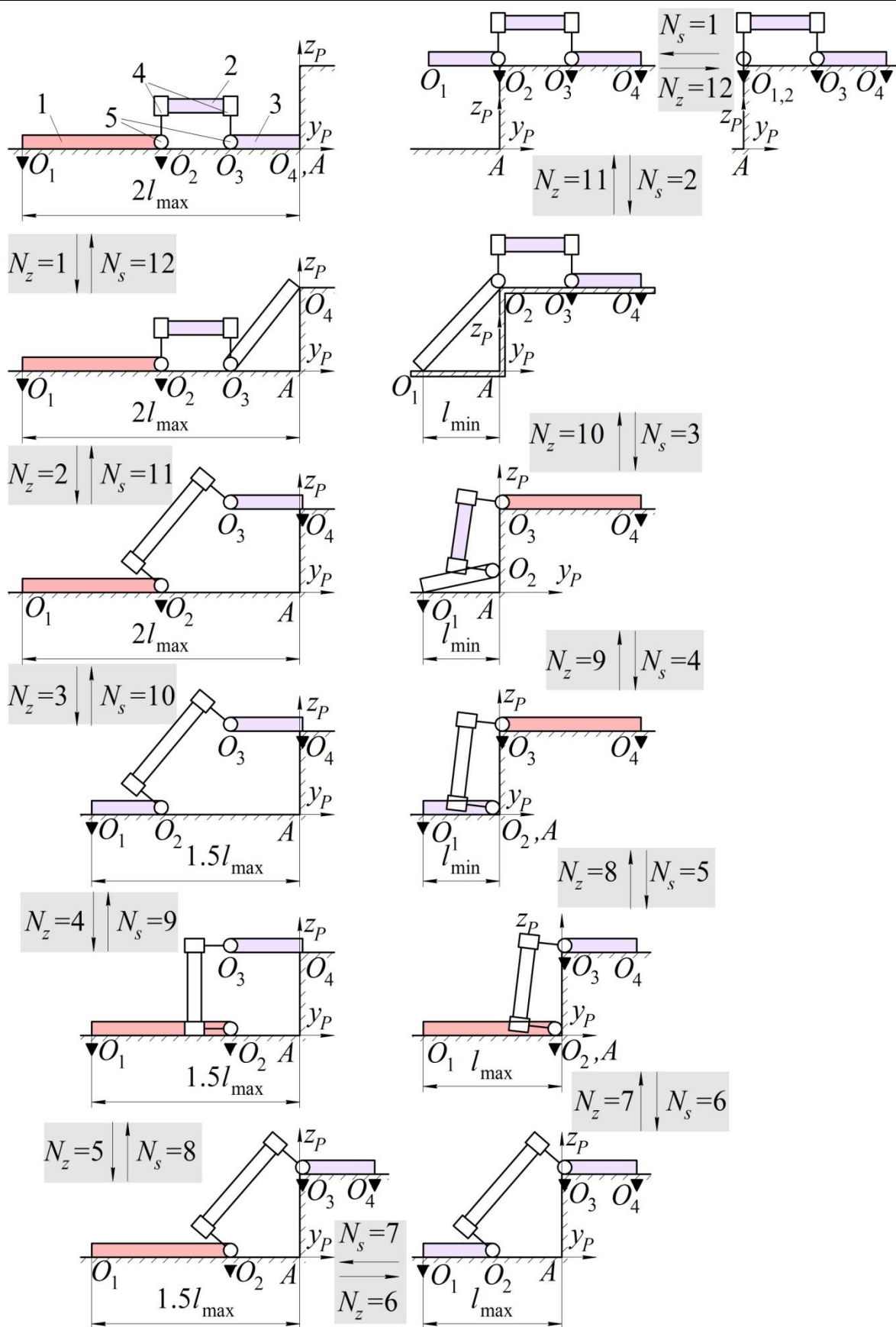


Рис. 1. Алгоритм заполнения / сползания робота

Fig. 1. Robot climbing / descending algorithm

Таблица 1. Описание этапов алгоритма заполнения / сползания робота

Table 1. Description of the stages of the robot climbing / descending algorithm

	Заполнение на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
	Начальное / конечное положение	
	$\mathbf{r}_{O4}^{(P)} = (x_A, y_A, 0)^T, l_1 = l_{\max}, l_{2,3} = l_{\min}, \theta_{1-3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Этап	$N_z=1$	$N_s=12$
Движение	Поворот звена 3 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и увеличение его длины таким образом, что точка O_4 скользит вверх по ступени	Поворот звена 3 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и уменьшение его длины таким образом, что точка O_4 скользит вниз по ступени
N^k	$z_{O4} = h_p$	$z_{O4} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O1}^{(P)} = (-2l_{\max}, 0, 0)^T, l_1 = l_{\max}, l_2 = l_{\min}, \theta_{1,2}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_3 = l_{\min} / \cos \theta_3^{(P)}$	
q	θ_3	
Этап	$N_z=2$	$N_s=11$
Движение	Повороты звеньев 2 и 3 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и по ней соответственно, увеличение длины звена 2 и уменьшение длины звена 3 таким образом, что ордината точки O_3 в системе координат ступени неизменна	Повороты звеньев 2 и 3 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и против нее соответственно, уменьшение длины звена 2 и увеличение длины звена 3 таким образом, что ордината точки O_3 в системе координат ступени неизменна
N^k	$l_3 = l_{\min}, \theta_3^{(P)} = 0$	$l_2 = l_{\min}, \theta_2^{(P)} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (-l_{\max}, 0, 0)^T, l_1 = l_{\max}, \theta_1^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_2 \cos \theta_2^{(P)} = l_{\min}, l_3 \cos \theta_3^{(P)} = l_{\min}, l_2 \sin \theta_2^{(P)} + l_3 \sin \theta_3^{(P)} = h_p$	
q	θ_2	
Этап	$N_z=3$	$N_s=10$
Движение	Уменьшение длины звена 1	Увеличение длины звена 1
N^k	$l_1 = l_{\min}$	$l_1 = l_{\max}$
Const	$\mathbf{r}_{O4}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_2 = \sqrt{l_{\min}^2 + h_p^2}, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0,$ $\theta_2^{(P)} = \arctg(h_p / l_{\min}), \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	

Продолжение табл. 1 / Table 1 (continuation)

	Заползание на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
Связи	-	
q	l_1	
Этап	$N_z=4$	$N_s=9$
Движение	Увеличение длины звена 1, поворот звена 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и уменьшение его длины таким образом, что положение точки O_3 неизменно	Уменьшение длины звена 1, поворот звена 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и увеличение его длины таким образом, что положение точки O_3 неизменно
N^k	$l_1 = l_{\max}$	$l_1 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O1}^{(P)} = (-1.5l_{\max}, 0, 0)^T, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p, l_1 + l_2 \cos \theta_2^{(P)} = l_{\max}$	
q	θ_2	
Этап	$N_z=5$	$N_s=8$
Движение	Поворот звена 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и увеличение его длины таким образом, что звено 3 располагается горизонтально и скользит вдоль оси Ay_p	Поворот звена 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и уменьшение его длины таким образом, что звено 3 располагается горизонтально и скользит вдоль оси Ay_p
N^k	$y_{O3}^{(P)} = 0$	$y_{O4}^{(P)} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (-l_{\min}, 0, 0)^T, l_1 = l_{\max}, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p$	
q	θ_2	
Этап	$N_z=6$	$N_s=7$
Движение	Уменьшение длины звена 1	Увеличение длины звена 1
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_2 = \sqrt{l_{\min}^2 + h_p^2}, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \theta_2^{(P)} = \arctg(h_p / l_{\min}), \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
N^k	$l_1 = l_{\min}$	$l_1 = l_{\max}$
Связи	-	
q	l_1	

Продолжение табл. 1 / Table 1 (continuation)

Этап	$N_z=7$	$N_s=6$
	Заползание на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
Движение	Увеличение длины звена 1, уменьшение длины звена 2 и его поворот в вертикальной плоскости против часовой стрелки	Уменьшение длины звена 1, увеличение длины звена 2 и его поворот в вертикальной плоскости по часовой стрелке
N^k	$l_1 = l_{\max}$	$l_1 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_3 = l_{\min}, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p, l_1 + l_2 \cos \theta_2^{(P)} = l_{\max}$	
q	θ_2	
Этап	$N_z=8$	$N_s=5$
Движение	Увеличение длины звена 3, уменьшение длины звена 1	Уменьшение длины звена 3, увеличение длины звена 1
N^k	$l_1 = l_{\min}, l_3 = l_{\max}$	$l_1 = l_{\max}, l_3 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_2 = h_p, \theta_{1,3}^{(P)} = 0, \theta_2^{(P)} = \pi / 2, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	-	
q	$(l_1, l_3)^T$	
Этап	$N_z=9$	$N_s=4$
Движение	Увеличение длины звена 1, уменьшение длины звена 2, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и по ней соответственно таким образом, что опора O_2 скользит вверх вдоль ступени	Уменьшение длины звена 1, увеличение длины звена 2, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и против нее соответственно таким образом, что опора O_2 скользит вниз вдоль ступени
N^k	$l_2 = l_{\min}$	$l_1 = l_{\min}$
Const	$\mathbf{r}_{O1}^{(P)} = (-l_{\min}, 0, 0)^T, l_3 = l_{\max}, \theta_2^{(P)} = \pi / 2, \theta_3^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_1 \cos \theta_1^{(P)} = l_{\min}, l_1 \sin \theta_1^{(P)} + l_2 = h_p$	
q	θ_1	
Этап	$N_z=10$	$N_s=3$
Движение	Увеличение длины звена 1, уменьшение длины звена 3, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости против часовой стрелки и по ней соответственно таким образом, что опора O_2 скользит вверх вдоль ступени	Уменьшение длины звена 1, увеличение длины звена 3, поворот звеньев 1 и 2 в вертикальной плоскости по часовой стрелке и против нее соответственно таким образом, что опора O_2 скользит вниз вдоль ступени

	Заползание на ступень / climbing	Сползание со ступени / descending
N^k	$l_3 = l_{\min}$	$l_3 = l_{\max}$
Const	$\mathbf{r}_{O4}^{(P)} = (l_{\max}, 0, h_p)^T, l_2 = l_{\min}, \theta_3^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_1 \cos \theta_1^{(P)} = l_{\min}, l_2 \cos \theta_2^{(P)} + l_3 = l_{\max}, l_1 \sin \theta_1^{(P)} + l_2 \sin \theta_2^{(P)} = h_p$	
q	θ_1	
Этап	$N_z=11$	$N_s=2$
Движение	Уменьшение длины звена 1 и его поворот в вертикальной плоскости по часовой стрелке таким образом, что ордината точки O_1 в системе координат ступени остается неизменной	Увеличение длины звена 1 и его поворот в вертикальной плоскости против часовой стрелки таким образом, что ордината точки O_1 в системе координат ступени остается неизменной
N^k	$z_{O1} = h_p$	$z_{O1} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O3}^{(P)} = (l_{\min}, 0, h_p)^T, l_{2,3} = l_{\min}, \theta_{2,3}^{(P)} = 0, \varphi_{1-3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	$l_1 \cos \theta_1^{(P)} = l_{\min}$	
q	θ_1	
Этап	$N_z=12$	$N_s=1$
Движение	Поворот звена 1 в горизонтальной плоскости против часовой стрелки	Поворот звена 1 в горизонтальной плоскости по часовой стрелке
N^k	$x_{O1}^{(P)} = l_{\min}$	$x_{O1}^{(P)} = 0$
Const	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (0, 0, h_p)^T, l_{1-3} = l_{\min}, \theta_{1-3}^{(P)} = 0, \varphi_{2,3}^{(P)} = \pi / 2$	
Связи	-	
q	φ_1	
	Конечное / начальное положение	
	$\mathbf{r}_{O2}^{(P)} = (x_A, y_A, h_p)^T, l_{1-3} = l_{\min}, \theta_{1-3}^{(P)} = 0, \varphi_1^{(P)} = \pi, \varphi_{2,3}^{(P)} = \pi / 2$	

Данный алгоритм состоит из двенадцати этапов (N_z для заползания и N_s для сползания, причем $N_s=12-N_z$), реализуемые звеньями движения описаны в табл. 1, условия завершения этапов обозначены как N^k . На каждом из этапов на движения звеньев робота наложены два вида связей: одни из них

обеспечивают постоянство той или иной обобщенной координаты во время выполнения этапа ("Const" в табл. 1), а вторые представляют собой геометрические соотношения между несколькими обобщенными координатами ("Связи" в табл. 1). Вектор обобщенных координат с учетом наложенных связей на

этапах обозначен в табл. 1 как q . Причем при разработке алгоритма принято допущение о том, что ординаты опорной точки, расположенной в непосредственной близости от оси Ax_P как перед ступенью, так и непосредственно на ней, считаются равными.

Разработанный алгоритм позволяет роботу преодолевать лестничные пролеты со ступенями, высота и длина которых связаны с длинами звеньев робота следующим образом:

$$\begin{aligned} h_{P\max} &= \sqrt{l_{\max}^2 - l_{\min}^2}, \\ h_{P\min} &= l_{\min}, \quad l_{P\min} = l_{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$

Причем этапы алгоритма построены таким образом, что робот всегда со-

храняет вертикальную устойчивость, его опрокидывание не допускается.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования заполнения робота ($l_{\max}=1$) на ступень лестничного пролета с высотой $h_P=0,7$, длиной $l_P=6l_{\max}$ и шириной $b_P=l_{\max}$ и сползания с нее представлены на рис. 2 в виде графиков изменения координат опорных точек и на рис. 3 в виде зависимостей длин звеньев и углов их поворота в вертикальной плоскости от этапов движения. Значения $l_{\max}$ и h_P , указаны в безразмерных величинах.

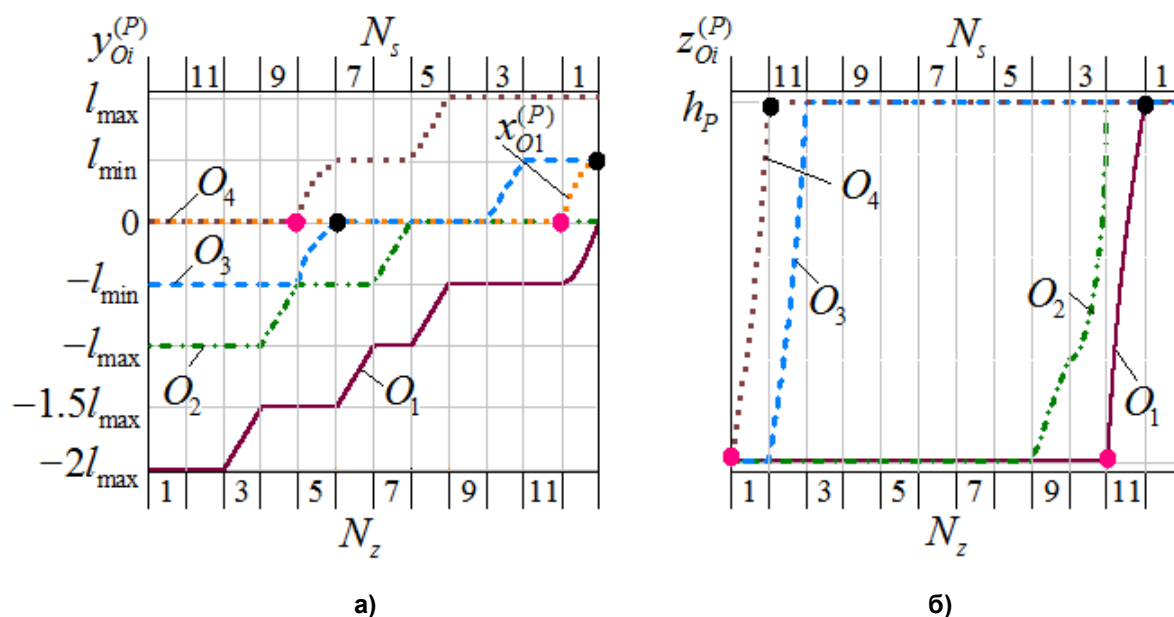


Рис. 2. Графики зависимостей: а – $x_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$, $y_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$, б – $z_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$

Fig. 2. Dependency graphs: а – $x_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$, $y_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$, б – $z_{O1}^{(P)}(N_z / N_s)$

Также на графиках показаны точки (черные для заполнения на ступень и розовые для сползания с нее), соответствующие выполнению условий N^k за-

вершения этапов движения. Рис. 2 позволяет проанализировать расположение опорных точек в моменты начала и завершения этапов, а также наглядно по-

казывает последовательность размещения опорных точек на ступени (О4 – О3 – О2 – О1) при заползании на нее и на плоскости AxPyP (О1 – О2 – О3 – О4) при сползании.

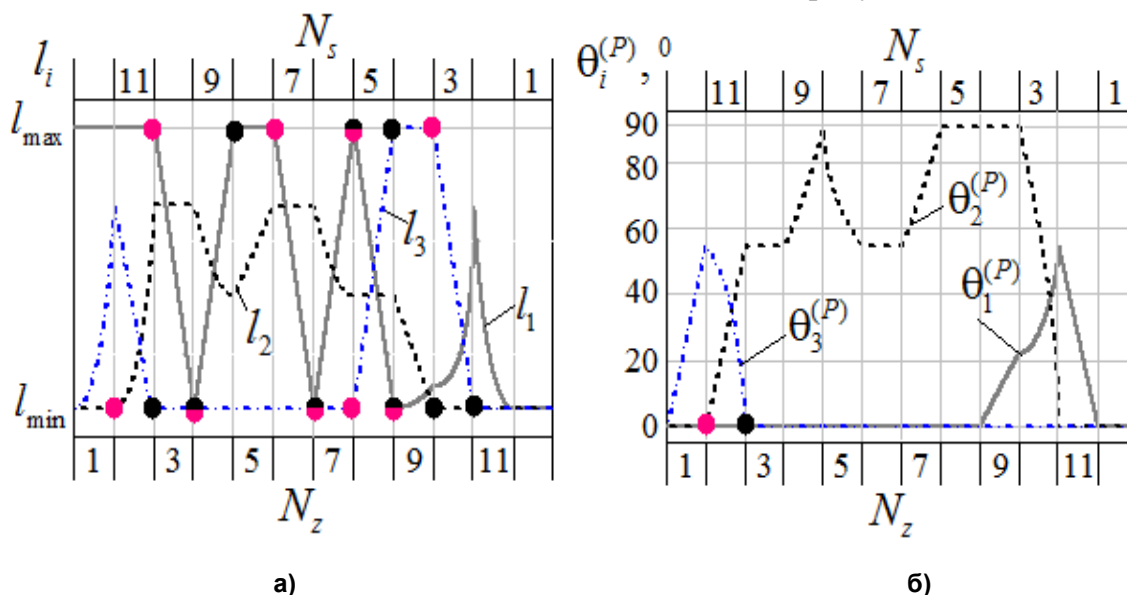


Рис. 3. Графики зависимостей: а – $l_i(N_z / N_s)$, б – $\theta_i^{(P)}(N_z / N_s)$

Fig. 3. Dependency graphs: а – $l_i(N_z / N_s)$, б – $\theta_i^{(P)}(N_z / N_s)$

По графикам рис. 3,а видно, что длины всех звеньев лежат в диапазоне $l_i \in [l_{\min}, l_{\max}]$, что также свидетельствует об адекватности разработанного алгоритма, причем

$$l_3(N_z=1/2)=l_2(N_z=3,6)=l_1(N_z=10/11), \quad (3)$$

$$\theta_3^{(P)}(N_z=1/2)=\theta_2^{(P)}(N_z=3,6)=\theta_1^{(P)}(N_z=10/11), \quad (4)$$

где $N_z=1/2$ и $N_z=10/11$ соответствуют моментам перехода из этапа 1 в 2 и 10 в 11. Данные равенства длин звеньев и углов их поворота в вертикальной плоскости обусловлены одинаковым расположением звеньев на указанных этапах или моментах переключения между ними.

Изменения положения точек О2-О4 вдоль оси AxP во время всего алгоритма не происходит, поэтому на рис. 2, а эти графики не показаны для большей наглядности рисунка.

Выводы

В работе предложен и поэтапно описан алгоритм заползания трехзвенного ползающего робота на ступень лестничного пролета, а также сползания устройства со ступени при выполнении обратной последовательности этапов. Алгоритм позволяет роботу преодолевать лестничные пролеты без потери вертикальной устойчивости и опрокидывания. Адекватность и работоспособность данного алгоритма подтверждена результатами численных экспериментов.

Список литературы

1. Tao W., Ou Y., Feng H. Research on Dynamics and Stability in the Stairs-climbing of a Tracked Mobile Robot // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2012. Vol. 9(4). P. 146.
2. Ben-Tzvi P., Ito S., Goldenberg A.A. A mobile robot with autonomous climbing and descending of stairs // Robotica. 2009. Vol. 27(2). P. 171-188.
3. Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot / J. Liu, Y. Wang, S. Ma, B. Li // IEEE Intern. Safety, Security and Rescue Robotics: Workshop. Kobe, Japan. 2005. P. 36-41.
4. Multi-objective optimization for a humanoid robot climbing stairs based on Genetic Algorithms / B. Sheng, M. Huaqing, L. Qifeng, Z. Xijing // IEEE Intern. Conf. on Information and Automation. Zhuhai, China. 2009. P. 66-71.
5. Zhang R., Vadakkepat P., Chew C.M. Motion planning of biped robot climbing stairs // Proc. of FIRA Robot World Congress. 2003. P. 1-3.
6. Takahashi Y., Nakayama H., Nagasawa T. Biped robot to assist walking and moving up-and-down stairs // IECON: Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. 1998. Vol. 2. P. 1140-1145.
7. Komura H., Yamada H., Hirose S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel // Advanced Robotics. 2015. Vol. 29(17). P. 1081-1094.
8. Pfotzer L., Klemm S., Rönnau A., Zöllner J.M., Dillmann R. Autonomous navigation for reconfigurable snake-like robots in challenging, unknown environments // Robotics and Autonomous Systems. 2017. Vol. 89. P. 123-135.
9. Yamada H., Takaoka S., Hirose S. A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism) // Advanced Robotics. 2013. Vol. 27(1). P. 47-60.
10. Development and control of articulated mobile robot for climbing steep stairs / M. Tanaka, M. Nakajima, Y. Suzuki, K. Tanaka // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2018. Vol. 23(2). P. 531-541.
11. Development of the snake-like rescue robot "KOHGA" / T. Kamegawa, T. Yarnasaki, H. Igarashi, F. Matsuno // ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. New Orleans, USA. 2004. Vol. 5. P. 5081-5086.
12. Yim M., Homans S., Roufas K. Climbing with snake-like robots // IFAC workshop on mobile robot technology. 2001. P. 21-27.
13. Borenstein J., Hansen M., Borrell A. The OmniTread OT-4 serpentine robot—design and performance // J. of Field Robotics. 2007. Vol. 24(7). P. 601-621.

14. Development of control for a serpentine robot / W.R. Hutchison, B.J. Constantine, J. Borenstein, J. Pratt // IEEE Intern. Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Jacksonville, USA. 2007. P. 149-154.
15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. Solving the Problem of Overcoming a Staircase Flight by a Multi-Link Crawling Robot // Intern. Conf. on Industrial Engineering. Sochi, Russia. 2020 (в печати).
16. Vorochaeva L., Savin S., Yatsun A. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction // Russian J. of Nonlinear Dynamics. 2019. Vol. 15(4). P. 623–632.
17. The study of special positions of a crawling robot when changing its configuration / L.Yu. Vorochaeva, A.V. Malchikov, A.S. Yatsun, A. Martinez // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 747. P. 012094.
18. Яцун С. Ф., Мальчиков А. В., Жакин А. И. Динамические опорные элементы ползающих роботов для движения по наклонным поверхностям // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 2-1. С. 89-95.
19. Яцун С. Ф., Мальчиков А. В. Автоматизированный мобильный комплекс для диагностики трубопроводов переменного диаметра // Автоматизация и современные технологии. 2012. №. 12. С. 3-8.
20. Carbone G., Malchikov A., Ceccarelli M., Jatsun S. Design and simulation of Kursk robot for in-pipe inspection // SYROM: Proc. of the 10th IFToMM Intern. Symposium on Science of Mechanisms and Machines. Brasov, Romania. 2010. P. 103-114.

References

1. Tao W., Ou Y., Feng H. Research on Dynamics and Stability in the Stairs-climbing of a Tracked Mobile Robot. *Intern. J. of Advanced Robotic Systems*, 2012, vol. 9, no. 4, 146 p.
2. Ben-Tzvi P., Ito S., Goldenberg A.A. A mobile robot with autonomous climbing and descending of stairs. *Robotica*, 2009, vol. 27, no. 2, pp. 171-188.
3. Liu J., Wang Y., Ma S., Li B. Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot. Proc. IEEE Intern. Safety, Security and Rescue Robotics: Workshop. Kobe, Japan. 2005, pp. 36-41.
4. Sheng B., Huaqing M., Qifeng L., Xijing Z. Multi-objective optimization for a humanoid robot climbing stairs based on Genetic Algorithms. Proc. IEEE Intern. Conf. on Information and Automation. Zhuhai, China. 2009, pp. 66-71.
5. Zhang R., Vadakkepat P., Chew C.M. Motion planning of biped robot climbing stairs. Proc. of FIRA Robot World Congress, 2003, pp. 1-3.

6. Takahashi Y., Nakayama H., Nagasawa T. Biped robot to assist walking and moving up-and-down stairs. *IECON: Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*. 1998; vol. 2, pp. 1140-1145.
7. Komura H., Yamada H., Hirose S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel. *Advanced Robotics*, 2015, vol. 29, no. 17, pp. 1081-1094.
8. Pfotzer L., Klemm S., Rönnau A., Zöllner J.M., Dillmann R. Autonomous navigation for reconfigurable snake-like robots in challenging, unknown environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, vol. 89, pp. 123-135.
9. Yamada H., Takaoka S., Hirose S. A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism). *Advanced Robotics*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 47-60.
10. Tanaka M., Nakajima M., Suzuki Y., Tanaka K. Development and control of articulated mobile robot for climbing steep stairs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 531-541.
11. Kamegawa T., Yarnasaki T., Igarashi H., Matsuno F. Development of the snake-like rescue robot "KOHGA". *ICRA: Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. New Orleans, USA. 2004; vol. 5, pp. 5081-5086.
12. Yim M., Homans S., Roufas K. Climbing with snake-like robots. *IFAC workshop on mobile robot technology*. 2001: 21-27.
13. Borenstein J., Hansen M., Borrell A. The OmniTread OT-4 serpentine robot—design and performance. *J. of Field Robotics*, 2007, vol. 24, no. 7, pp. 601-621.
14. Hutchison W.R., Constantine B.J., Borenstein J., Pratt J. Development of control for a serpentine robot. *IEEE Intern. Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. Jacksonville, USA. 2007, pp. 149-154.
15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. Solving the Problem of Overcoming a Staircase Flight by a Multi-Link Crawling Robot. *Proc. Intern. Conf. on Industrial Engineering*. Sochi, Russia, 2020 (in press).
16. Vorochaeva L., Savin S., Yatsun A. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction. *Russian J. of Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 623–632.
17. Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Yatsun A.S., Martinez A. The study of special positions of a crawling robot when changing its configuration. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020; vol. 747, 012094 p.
18. Jatsun S.F., Mal'chikov A.V., Zhakin A. I. Dinamicheskie opornye elementy polzayushchikh robotov dlya dvizheniya po naklonnym poverkhnostyam [Dynamic contact elements of crawling robots for moving on inclined surfaces]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, vol. 2-1, pp. 89-95 (In Russ.).

19. Jatsun S.F., Mal'chikov A.V. Avtomatizirovannyi mobil'nyi kompleks dlya diagnostiki truboprovodov peremennogo diametra [Automated mobile system for diagnostics of variable diameter pipelines]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and Modern Technologies*, 2012; vol. 12: 3-8 (In Russ.).

20. Carbone G., Malchikov A., Ceccarelli M., Jatsun S. Design and simulation of Kursk robot for in-pipe inspection. SYROM: Proc. of the 10th IFToMM Intern. Symposium on Science of Mechanisms and Machines. Brasov, Romania. 2010: 103-114.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ворочаева Людмила Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mila180888@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2791-3697>, Reseaher ID: N-7205-2016

Савин Сергей Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования, Университет Иннополис, г. Иннополис, Российская Федерация, e-mail: s.savin@innopolis.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7954-3144>, Reseaher ID: N-8048-2016

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

Lyudmila Yu. Vorochaeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mila180888@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2791-3697>, Reseaher ID: N-7205-2016

Sergei I. Savin, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher at Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University, Innopolis, Russian Federation, e-mail: s.savin@innopolis.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7954-3144>, Reseaher ID: N-8048-2016

Andrey V. Mal'chikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-35-50>

Адаптивное управление нелинейным объектом типа конвертоплан в условиях неопределенностей

С.Ф. Яцун¹, О.В. Емельянова¹ ✉, Андрес Сантьяго Мартинез Леон¹,
Луис Мигель Москера Морочо¹

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

✉ e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается задача мониторинга водных акваторий с целью контроля за её физико-химическим состоянием с помощью летающей лаборатории (ЛЛ), в состав которой входят летательный аппарат с навесным водозаборным оборудованием и программно-аппаратный комплекс. Особенностью мониторинга открытых водоёмов являются непредсказуемость поведения воздушной и водной среды, периодическое отсутствие визуального контакта оператора с летательным аппаратом, неопределённость характеристик трикоптера. Поэтому целью данной статьи является исследование параметров системы управления (СУ) для обеспечения требований точности позиционирования летательного аппарата в условиях неопределенностей внешних параметров.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы теоретической механики и механики роботов. При изучении закономерностей движения конвертоплана использовались методы математического моделирования динамических систем. Для планирования и управления движением летательного аппарата применялось адаптивное управление с эталонной моделью.

Результаты. Использование адаптивного управления движением ЛЛ позволило обеспечить сходимость к нулю ошибки слежения, т.е. разности между выходными сигналами и эталонной моделью. Предложенная система управления даёт хороший результат при небольших возмущающих воздействиях. Определены параметры регулятора, обеспечивающие качественные показатели САУ в заданных пределах.

Заключение. Разработана математическая модель и выполнено математическое моделирование движения конвертоплана в условиях неопределенностей внешних воздействий. Рассмотрена задача параметрического управления трикоптером, когда настройке доступны коэффициенты регулятора. Разработанные алгоритмы в системе адаптивного управления позволили обеспечить скорейшее подавление внешних возмущений по сравнению с традиционной системой ПИД регулирования для случая линейного описания объекта управления.

Ключевые слова: конвертоплан-трикоптер; адаптивное управление; эталонная модель; алгоритм скоростного градиента.

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

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90053.

© Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Андрес Сантьяго Мартинез Леон, Луис Мигель Москера Морочо, 2020

Для цитирования: Адаптивное управление нелинейным объектом типа конвертоплан в условиях неопределенностей / С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, Андрес Сантьяго Мартинез Леон, Луис Мигель Москера Морочо // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 35-50. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-35-50>.

Поступила в редакцию 11.05.2020

Подписана в печать 02.06.2020

Опубликована 30.06.2020

Adaptive Control of a Nonlinear Convertiplane under Conditions of Uncertainty

Sergey F. Yatsun¹, Oksana V. Emelyanova¹ ✉,
Andres Santiago Martinez Leon¹, Luis Miguel Mosquera Morocho¹

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

✉ e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The article deals with the problem of monitoring water areas in order to control their physical and chemical conditions using a flying laboratory (FL) which includes an aircraft with attachable water intake equipment and a software and hardware system. A specific feature of the monitoring of surface waters is the unpredictable behavior of air and water, periodic absence of visual contact with the aircraft, the uncertainty of tricopter characteristics. Therefore, the purpose of this article is to study the parameters of the control system (CS) to meet the requirements for the accuracy of aircraft positioning in conditions of uncertainty of external parameters.

Methods. Theoretical mechanics and robot mechanics methods were used to solve the set tasks. Methods for mathematical modeling of dynamic systems were used to study the patterns of convertiplane movement. Adaptive control with a reference model were used to plan and control the movement of the aircraft.

Results. The use of adaptive FL motion control made it possible to ensure convergence to zero of the tracking errors i.e., the difference between the output signals and the reference model. The proposed control system gives a good result with small disturbing effects. The parameters of the regulator that ensure the quality indicators of the ACS within the specified limits are determined.

Conclusion. A mathematical model was developed and mathematical modeling of the convertiplane movement under conditions of uncertainty of external influences was performed. The problem of parameter control of a convertiplane was considered when the control coefficients were available for setting. The developed algorithms in the adaptive control system made it possible to provide faster suppression of external disturbances in comparison with the traditional PID control system for the case of a linear description of the controlled object.

Keywords: convertiplane-tricopter, adaptive control, model reference, velocity gradient algorithm.

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 as a part of the research project № 19-33-90053.

For citation: Yatsun S. F., Emelyanova O. V., Andres Santiago Martinez Leon, Luis Miguel Mosquera Morocho Adaptive Control of a Nonlinear Convertiplane under Conditions of Uncertainty // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 35-50 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-35-50>.

Received 11.05.2020

Accepted 02.06.2020

Published 30.06.2020

Введение

Управление полетом беспилотных летательных аппаратов различных типов (три-, квадрокоптеров) рассматривалось во многих работах¹ [1-4, 5, 6] как без учета внешних периодических нагрузок, так и с учетом, моделируемые силой сопротивления движению [7-9]. Выявлены зависимости отклонения реальной позиции аппарата от заданной при изменении значений коэффициентов регулятора и времени переходного процесса. Однако задача моделирования и исследования влияния внешних возмущающих нагрузок представляет собой сложную задачу, связанную с возникновением закручивающих ветровых потоков или кратковременных порывов ветра, для которых никакой информации об их значениях нет, кроме возможных пределов их значения. В свою очередь, они способны существенно влиять на точность позиционирования аппарата даже при его небольших абсолютных скоростях.

Поэтому целью данной статьи является исследование параметров системы управления (СУ) для обеспечения требований точности позиционирования летательного аппарата в условиях неопределенностей внешних параметров.

Материалы и методы

1. Постановка задачи мониторинга водоёмов

Рассмотрим задачу мониторинга водных акваторий с целью контроля за её физико-химическим состоянием. Данные мониторинга дадут возможность оперативно выявлять и точно определять координаты опасных зон, а также отслеживать и прогнозировать дальнейшее состояние вод. Наиболее перспективным и востребованным для решения подобного рода задач является использование малоразмерных высокоманевренных беспилотных летательных аппаратов, которые представляют собой летающую лабораторию (ЛЛ), в состав которой входят летательный аппарат с навесным водозаборным оборудованием и программно-аппаратный комплекс, позволяющий управлять аппаратом в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режиме, а также вести прием, хранение и отображение полученной с борта летательного аппарата телеметрической информации.

В соответствии с ГОСТ Р.31861-2012² отбор проб сериями для проведения исследований, отражающих качество (состав и свойства) исследуемой воды, возможен как на различных глубинах, так и на определенной глубине в

¹ Chollom T. D. Investigation of Linear Quadratic Control and Guidance System Design for a Small UAV : дис. University of Leicester, 2019.

² ГОСТ Р. 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2013.

конкретном или различных местах (пробы профиля площади).

В качестве летательного аппарата рассмотрим трикоптерную схему мультикоптера – с тремя парами отклоняемых винтов, расположенных на каждой из осей пропеллера, вращающихся в противоположные стороны.

Отличие данной модели состоит в том, что устойчивость летательного аппарата (ЛА) достигается за счет использования специальной формы крыла, а быстродействие горизонтального перемещения – за счет синхронного отклонения векторов тяги передних поворотов винтов. Такие аппараты получили

название конвертопланов, в которых сочетаются признаки вертолетной схемы – вертикальный подъём (спуск) и самолетной схемы – полёт в горизонтальной плоскости при наличии крыла и за счёт изменения вектора тяги [10-12, 4, 8, 9, 5, 13, 14].

Процесс мониторинга водоёма приведен на рис. 1 и представляет собой совокупность действий, состоящих из движения ЛЛ по заданной траектории AB к заданной точке пространства (положение I), отбор пробы в определенной точке с координатами $P(X_P, Y_P)$ (положение II) и возврат на базу (положение III).

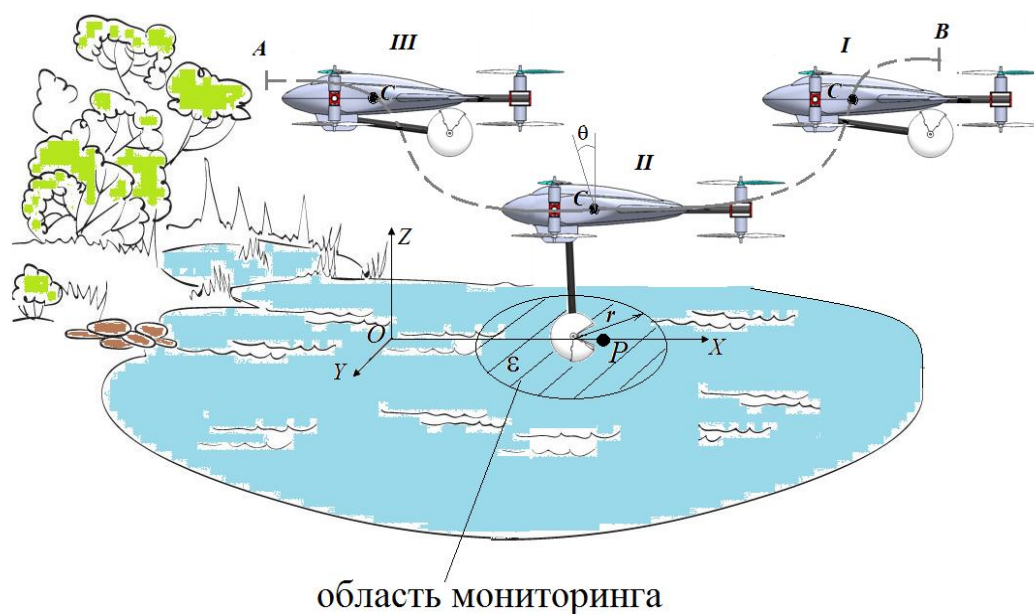


Рис.1. Процесс мониторинга водных акваторий

Fig.1. Water areas monitoring process

Возможно применение двух стратегий полёта ЛЛ к месту отбора пробы: монотонное движение по гладкой траектории с захватом порции жидкости, необходимой для исследования, «на лету» и

движение с остановкой и зависанием над заданной областью мониторинга.

В первом случае система управления летательного аппарата должна обеспечить попадание в заданную окрестность ε

точки P пространства, радиуса r , определяемую при отсутствии отказов и с учётом ветровых неопределённостей, а также сил сопротивления водозаборного устройства (ВЗУ) при движении в жидкости. В этих условиях обеспечить точность позиционирования достаточно сложно, так как эта область должна находиться в заданных пределах: $\bar{r}_P - \bar{r} < \bar{r}_P^* < \bar{r}_P + \bar{r}$, где $\bar{r}_P, \bar{r}_P^*$ – планируемый и реальный радиус-векторы точки пространства P .

Второй случай является предпочтительнее, так как повышается точность позиционирования ЛЛ, а система управления должна обеспечивать поддержа-

ние необходимой высоты центра масс Z_C летательного аппарата над поверхностью воды с учетом действия ветровых факторов.

Таким образом, будем рассматривать задачу зависания ЛЛ над областью мониторинга с последующим отбором проб жидкости в условиях непредсказуемости поведения воздушной и водной среды.

2. Описание беспилотного летательного аппарата

Рассмотрим плоское движение ЛА трикоптерного типа в системе координат XOZ (рис.2) [10-12].

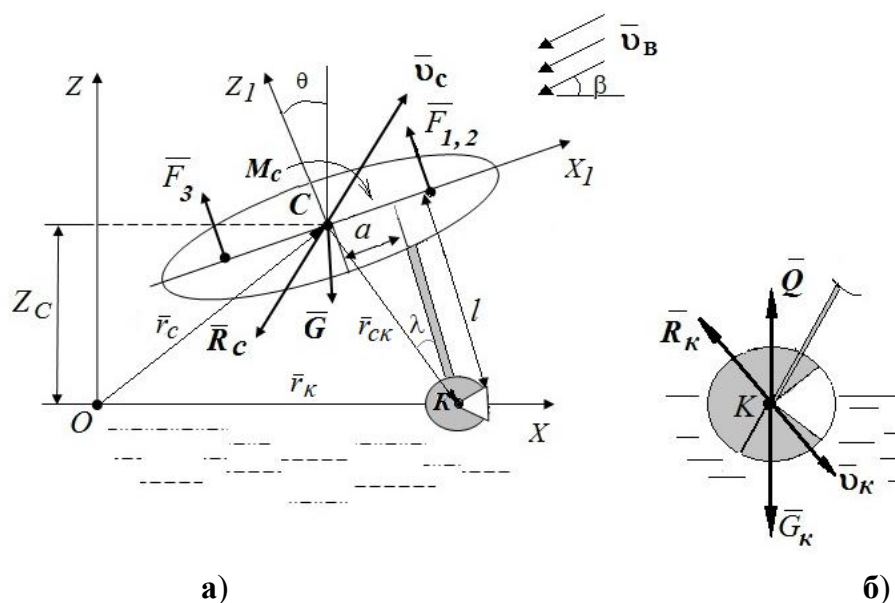


Рис.2. Схема сил взаимодействия ВЗУ летательного аппарата с водной поверхностью:

а – общий вид; **б** – схема сил, возникающих при контакте ВЗУ с поверхностью раздела; $\bar{G}, \bar{G}_k$ – вес ЛА и навесного оборудования; $\bar{R}_c$ – главный вектор силы сопротивления движению корпуса в воздушной среде; $\bar{Q}$ – Архимедова сила; $\bar{R}_k$ – силы сопротивления водной среды

Fig. 2. Diagram of the forces of interaction of the aircraft water intake device (WID) with the water surface: **а** – general view; **б** – forces occurring when the WID contacts the surface; $\bar{G}, \bar{G}_k$ are the mass of the aircraft and attached equipment; $\bar{R}_c$ is the main vector of the resistance force to the movement of the body in the air; $\bar{Q}$ is the buoyancy force; $\bar{R}_k$ – water resistance forces

Движение трикоптера будем рассматривать относительно неподвижной декартовой системы координат OXZ , в постановке задачи движения твердого тела с центром масс корпуса в точке C , причем свободная поверхность водоёма совпадает с осью OX . В общем случае ориентацию корпуса в пространстве задают самолетные углы рысканья ψ , тангажа θ и крена φ . Однако, с точки зрения устойчивости, представляет интерес исследование тангажа аппарата относительно его поперечной оси CZ_I .

Будем обозначать символами (0) и (1) векторы, определённые в системах координат OXZ и $CX_I Z_I$, соответственно.

Положение центра масс конвертоплана с помощью радиус вектора, связывающего точки O и C систем координат:

$$\vec{r}_C^{(0)} = \begin{bmatrix} X_C \\ Z_C \end{bmatrix}.$$

Положение центра масс K водозаборной ёмкости:

$$\vec{r}_K^{(0)} = \vec{r}_C^{(0)} + \vec{r}_{CK}^{(0)}, \quad (1)$$

а вектор её скорости:

$$\vec{v}_K^{(0)} = \vec{v}_C^{(0)} + \vec{v}_{CK}^{(0)}, \quad (2)$$

где T_θ – матрица перехода из (1) в (0) систему координат, модуль скорости

$$v_{CK}^{(1)} = \dot{\theta} \sqrt{l^2 + a^2},$$

$$\vec{r}_{CK}^{(0)} = T_\theta \cdot \vec{r}_{CK}^{(1)} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ l \end{bmatrix}.$$

В общем случае вектор сил, действующих на трикоптер $\vec{B}$, представим в виде вектора-строки:

$$\vec{B} = [\vec{F}_i^{(1)} \ \vec{R}_C^{(0)} \ \vec{G}_i^{(0)} \ \vec{R}_K^{(0)} \ \vec{Q}^{(0)}]^T. \quad (3)$$

С учетом параллельности векторов сил тяги винтов оси CZ_I , в неподвижной системе координат вектор $\vec{F}_i^{(0)}$ определим как

$$\vec{F}_i^{(0)} = T_\theta \sum \vec{F}_i^{(1)}. \quad (4)$$

Силы, возникающие в результате взаимодействия ВЗУ с окружающей средой, имеют сложный характер распределения в пространстве. Будем полагать, что на ЛА действуют: сила веса G_K погруженного тела вместе с штангой, главный вектор силы сопротивления водной среды при контакте с ВЗУ, приложенной в точке K их касания – $\vec{R}_K$, а так же Архимедова сила $\vec{Q}$, проходящая через центр тяжести погруженного объёма тела.

Вектор сил сопротивления определим как:

$$\vec{\Phi} = (\vec{R}_C^{(0)}, \vec{R}_K^{(0)}). \quad (5)$$

Вектор силы сопротивления движению корпуса в воздушной среде:

$$\begin{aligned} \vec{R}_C^{(0)} &= [R_{Cx}^{(0)} \ R_{Cz}^{(0)}]^T; \\ \vec{R}_C^{(0)} &= -(\mu \vec{v} + \vec{v}^T k \vec{v}), \end{aligned} \quad (6)$$

где μ, k – матрицы эмпирических коэффициентов сопротивления, зависящие от геометрических характеристик крыла, формы его профиля, угла атаки несущих винтов; $\vec{v}$ – относительная скорость центра масс трикоптера, которая является разностью векторов скоростей центра масс $\vec{v}_C$ системы координат OXZ и вектора скорости воздушного потока $\vec{v}_B$:

$$\bar{v} = \bar{v}_C - \bar{v}_B. \quad (7)$$

Закон изменения воздушного потока является случайной функцией времени, которую представим как

$$v_B(t) = v_0 + v_B \sin \Omega t, \quad (8)$$

где v_B , Ω – случайные параметры амплитуды и частоты ветровой нагрузки.

$$\bar{R}_K^{(0)} = \begin{bmatrix} 0, & Z_C^{(0)} > (l^2 + a^2) \cos(\theta + \lambda) \\ v_K^T \bar{\mu}_K, & (l^2 + a^2) \cos(\theta + \lambda) - R \leq Z_C^{(0)} \leq (l^2 + a^2) \cos(\theta + \lambda) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где μ – матрица эмпирических коэффициентов сопротивления, зависящая от свойств жидкости; R – радиус ёмкости ВЗУ.

В качестве модели водной среды примем несжимаемую вязкую жидкость, для которой вязкость $\mu_{ж} = const$ и плотность $\rho = const$, скорость относительного изменения элементарного объема жидкости в точке поля скоростей $div V = 0$ [15, 16].

Архимедова сила $\bar{Q}$, равная весу в объёме погруженного в неё жидкости, можно принять равной весу $\bar{G}_K$, так как, как было упомянуто выше, крышка водозаборной ёмкости находится в открытом состоянии и жидкость поступает вовнутрь практически одновременно, как только свободная поверхность водоёма сравняется с открытым окном ВЗУ.

$$\bar{Q} = \rho g V \bar{k}, \quad (10)$$

где V – объём проб жидкости; $\bar{k}$ – единичный вектор.

При контакте ВЗУ с поверхностью водоёма, а так же в результате смещения его центра масс K относительно центра масс трикоптера C возникает

Взаимодействие тела со свободной поверхностью водоёма описывается вектором силы сопротивления водной среды R_K и зависит от скорости сближения трикоптера с водной средой: Так как ВЗУ с трикоптером движутся плоскопараллельно, то считаем $\bar{v}_K = \bar{v}_C + \bar{v}_{CK}$, где $\bar{v}_{CK} = \dot{\theta} \times C\bar{K}$. Таким образом:

момент M_{Cy} , зависящий от внешних сил и сил сопротивления, который имеет сложный кусочно-линейный характер (рис.3).

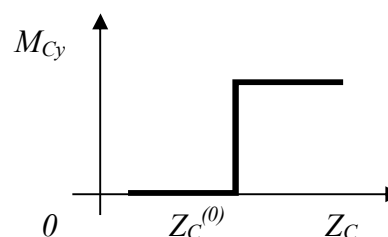


Рис. 3. График зависимости внешнего момента M_{Cy} от вертикальной координаты центра масс трикоптера: $Z_C^{(0)}$ – вертикальная координата в инерциальной системе отчета

Fig. 3. Graph of the external moment M_{Cy} dependence on the vertical coordinate of the tricopter mass center: $Z_C^{(0)}$ is the vertical coordinate in the inertial system

3. Математическое моделирование движения трикоптера

Движение трикоптера в плоскости Oxz можно описать тремя независимыми дифференциальными уравнениями первого порядка, методика построения которых подробно изложена в [10, 11, 12, 4, 7, 8, 17]. В общем виде их можно представить следующим образом:

$$D\dot{\bar{q}} + F(\bar{q}) = M, \quad (11)$$

$$\text{где } D = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{OY1} \end{bmatrix} - \text{матрица инер-$$

ции системы; m – масса аппарата; I_{OY1} – момент инерции системы, относительно оси вращения CY_1 ; $\bar{q} = [\bar{v}_C \ \omega]^T \in \mathbb{R}^3$ – вектор обобщенных координат, задаваемый положение трикоптера; $\bar{v}_C$ – абсолютная скорость центра масс C тела в неподвижной системе отчета; $\bar{\omega} = \dot{\theta}$ – угловая скорость вращения аппарата относительно центра масс C :

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cz} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \dot{\bar{q}} = \begin{bmatrix} \dot{v}_{Cx} \\ \dot{v}_{Cz} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}; F(\bar{q}) = \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_{CY1} \end{bmatrix}, -$$

вектор сил и моментов, действующих на систему внешних сил; $M = [\bar{\Phi}, \bar{M}(\bar{\Phi})]^T$ – вектор сил и моментов внешних возмущений.

Таким образом, уравнение (1) примет вид:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{OY1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{Cx} \\ \dot{v}_{Cz} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_{CY1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_x \\ \Phi_z \\ M_{CY1}(\Phi) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Эту систему дифференциальных уравнений необходимо дополнить уравнениями, связывающими угловую скорость роторов пропеллеров и управляющих напряжений, поступающих на электродвигатели [10, 7, 9]:

$$\dot{\omega} = \frac{-\frac{c_E c_M}{R} \eta \omega - d \omega_i^2 + \frac{c_M}{R} \eta U_i}{(J_p + \eta J_M)}, \quad (13)$$

где J_p, J_M – момент инерции ротора вокруг оси винта и оси мотора соответ-

ственно; d – аэродинамическая постоянная; c_E, c_{Mi} – коэффициенты пропорциональности, называемый постоянной ЭДС и момента электродвигателя; J_i – приведенный осевой момент инерции; U_i – управляющее напряжение ($i=1, 2, 3$); η – КПД электропривода.

4. Адаптивное управление с эталонной моделью

Особенностью мониторинга открытых водоёмов являются непредсказуемость поведения воздушной и водной среды, периодическое отсутствие визуального контакта оператора с летательным аппаратом, неопределенность характеристик трикоптера, т.е. неполнота априорной и текущей информации об их параметрах, которые существенно затрудняют анализ и проектирование системы управления, одной из главных задач которой является подавление влияния таких воздействий на трикоптер, поскольку это отрицательно сказывается на статической и динамической устойчивости БПЛА. Поэтому управление необходимо рассматривать с учетом того, что ряд параметров являются неопределенными.

Для изучения таких систем применяются стохастические подходы, основанные на методах наименьших квадратов и калмановской фильтрации [16, 17]. Однако на практике знание законов статистических распределений неопределенных величин зачастую является трудновыполнимым условием, тогда как проще задаваться только верхними и нижними границами их распределений.

Для планирования и управления движением летательного аппарата применим адаптивное управление с эталонной моделью. Здесь, используется текущая информация о внешних воздействиях, условиях работы системы и выходных величинах для изменения структуры, параметры регулятора необходимых для обеспечения оптимального или заданного функционирования управляемой системы при изменяющихся условиях ее работы. Эталонная модель выступает как заданное динамическое звено, реализующее требования к системе по окончании процесса адаптации [18, 19].

Результаты и их обсуждение

Будем рассматривать задачу параметрического управления трикоптером, когда настройке доступны коэффициенты регулятора.

Преобразуем дифференциальное уравнение движения трикоптера (11), к виду:

$$\dot{\bar{q}} = D^{-1}M\bar{q} + D^{-1}F(\bar{q}), \quad (14)$$

$$\text{где } D^{-1} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_{OY1} \end{bmatrix} - \text{обратная}$$

матрица; $M = [(\Phi_X, \Phi_Y) \quad M_{CY}(\Phi)]^T$ – внешнее возмущающее воздействие;

$$\bar{F}(\bar{q}) = \begin{bmatrix} (F_1 + F_2 + F_3) \sin \theta \\ (F_1 + F_2 + F_3) \cos \theta \\ (F_1 + F_2)l_1 + F_3l_2 \end{bmatrix} - \text{вектор}$$

управляющих воздействий; l_1, l_2 – геометрические размеры.

Проведем линеаризацию уравнения (14). При малых значениях параметра θ

вектора $\bar{q}$ в окрестностях рабочей точки $\theta=0$ применим приближенные формулы: $\sin(\theta) \approx \theta$; $\cos(\theta) \approx 1$.

Уравнение (14) примет вид:

$$\dot{\bar{q}} = A\bar{q} + B\bar{u}, \quad (15)$$

где A, B – матрицы параметров объекта вида $A(\bar{q}) = [a_{ij}(\bar{q})] (i, j = 1, \bar{n})$, $n=3$;

$$B(\bar{q}) = [b_{ij}(\bar{q})] (i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{m})$$
, $m=3$;

$\bar{u}$ – вектор управления, $\bar{u} \in R^m$; $m \leq n$.

Матрицы параметров объекта и вектора управления примут вид:

$$A = D^{-1} \begin{bmatrix} \mu_X \\ \mu_Z \\ \mu_\theta \end{bmatrix}; \quad B = D^{-1} \begin{bmatrix} \theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^3 F_i \\ \sum_{k=1}^3 F_i \\ M \end{bmatrix}, \quad (16)$$

Цель управления – обеспечить стремление вектора $\bar{q}$ к вектору состояния эталонной модели $\bar{q}_m(t)$, являющемуся решением уравнения:

$$\dot{\bar{q}}_m = A_m \bar{q}_m + B_m \bar{r}(t), \quad (17)$$

где A_m, B_m – матрицы, причем A_m – гурвицева.

Эталонная модель представляет собой передаточную функцию апериодического звена 1-го порядка:

$$W = \frac{k}{T_p + 1}, \quad (18)$$

где k – коэффициент усиления звена; T_p – постоянная времени, характеризующая инерционность звена.

Определим целевую функцию, которая подлежит минимизации, в виде [18, 19]:

$$\bar{Q}_t = \frac{1}{2} \bar{e}^T H \bar{e}, \quad (19)$$

где $e = \bar{e}(t) = \bar{q}(t) - \bar{q}_M(t)$ – вектор ошибки; $H = H^T > 0$ – положительно определенная матрица 3×3 .

Дифференцируем (19) с учетом (15), (16) вычислим скорость изменения целевой функции:

$$\dot{\bar{Q}}_t = \bar{e}^T H [A\bar{q} + B\bar{u} - A_M \bar{q}_M - B_M r(t)]. \quad (20)$$

Выберем закон управления в виде:

$$\bar{u} = k_r \bar{r}(t) + k_q \bar{q}, \quad (21)$$

где k_r, k_q – настраиваемые параметры;

$$\bar{r}(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}^* \\ \dot{Z}^* \\ \dot{\theta}^* \end{bmatrix} - \text{вектор задающих воз-}$$

действий.

Для построения алгоритма скоростного градиента, используем симметричную положительную матрицу $\Gamma = \Gamma^T > 0$ ($\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_m\}$, $\gamma > 0$), в которой положим $\Gamma = \gamma I_N$ (I_N – единичная матрица), $\gamma_i > 0$ – коэффициент скорости адаптации [17].

Закон адаптации настраиваемых параметров имеет вид:

$$\frac{dk_r}{dt} = -\gamma B^T H e r^T, \quad \frac{dk_q}{dt} = -\gamma B^T H e q^T. \quad (22)$$

Определение коэффициента γ имеет значение, так как от него зависит качество адаптации.

Структурная схема системы управления представлена на рис.4. Результаты применения адаптивной системы управления с эталонной моделью и САУ с традиционным PID регулятором для управления движением ЛЛ при наличии внешнего периодического возмущения, представлены на рис.5.

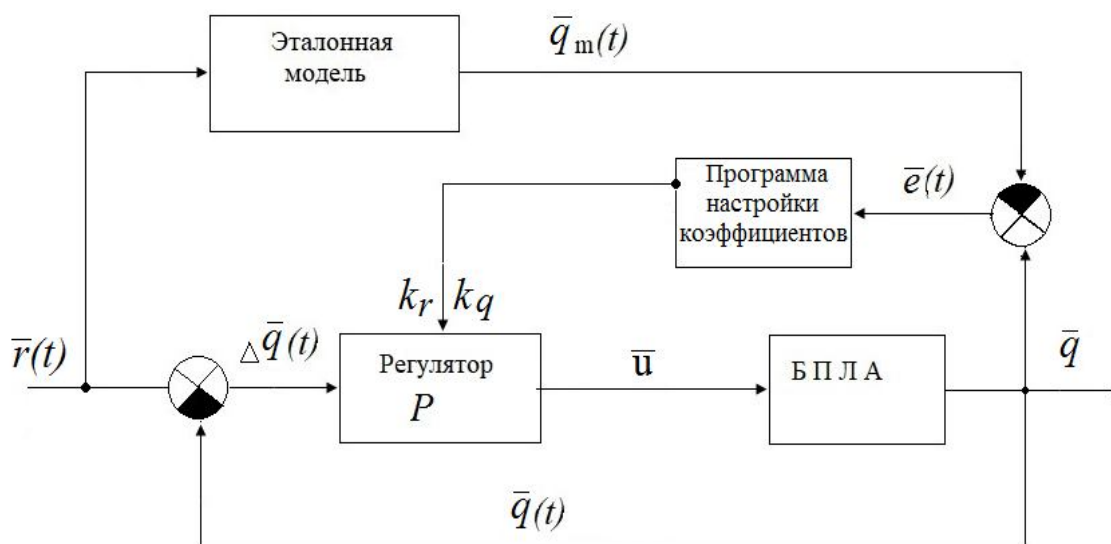


Рис. 4. Структурная схема системы адаптивного управления

Fig. 4. Block diagram of the adaptive control system

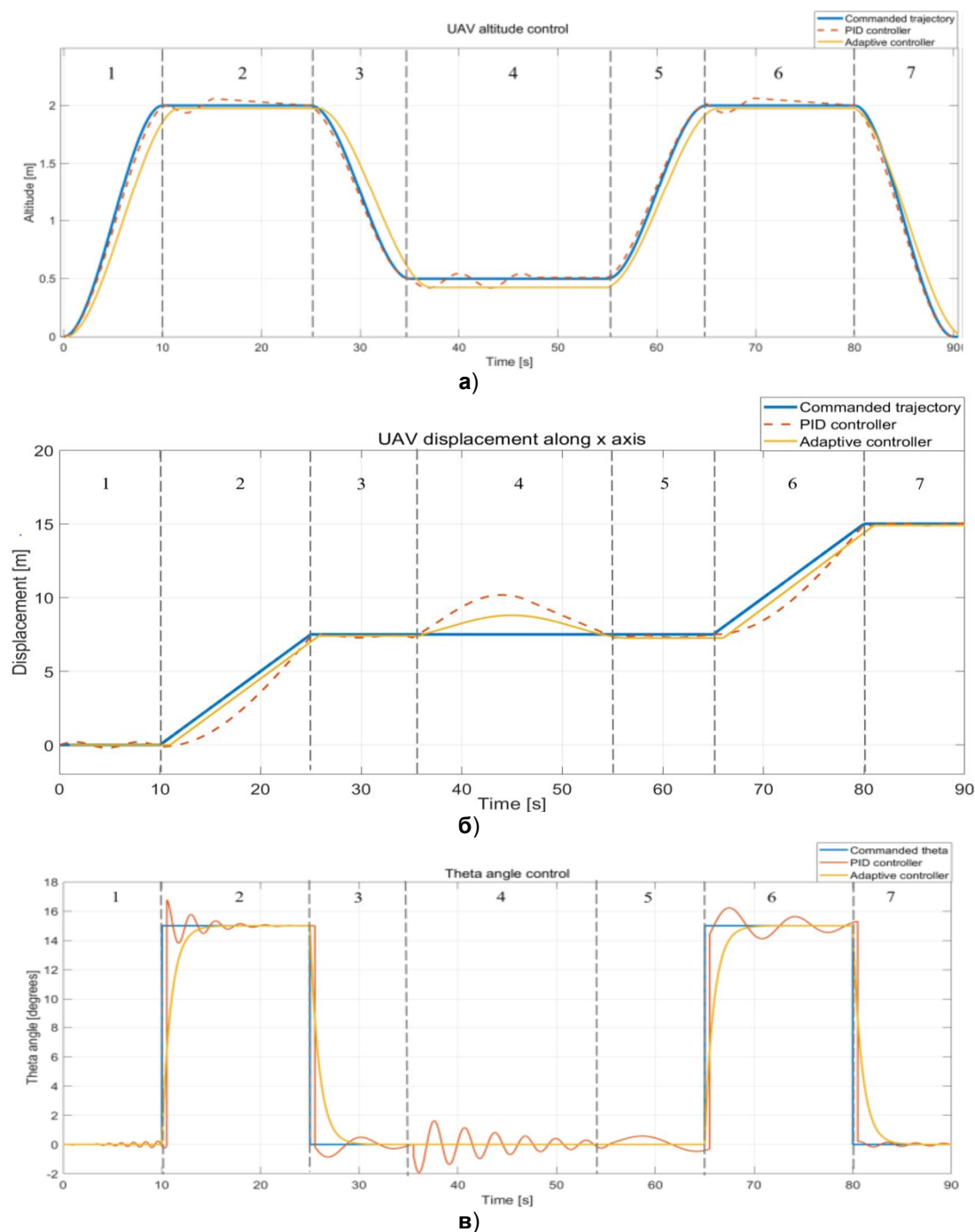


Рис.5. Графики отклонения центра масс ЛП от заданного при действии горизонтального возмущения для различных стратегиях управления: **а, б** – движение вдоль осей OZ и OX соответственно; **в** – изменение угла тангажа θ ; **1** – отрыв аппарата от земли; **2** – перемещение вдоль оси OX от точки А до заданной точки отбора проб воды (см. рис.1); **3** – снижение; **4** – отбор проб воды, возникновение встречного ветра (направление - вдоль оси OX); **5** – набор высоты; **6** – перемещение вдоль горизонтальной оси от точки отбора проб воды до точки В (см. рис.1); **7** – посадка

Fig.5. Graphs of the setoff of the center of gravity of the FL from the given one under the action of horizontal disturbance for various control strategies: **а, б** – movement along the OZ and OX axes, respectively; **в** - pitch deflection θ ; **1** – lift off; **2** – movement along OX axis from point A to a given point of water sampling (see Fig. 1); **3** – descent; **4** – water sampling, the occurrence of a headwind (direction - along the OX axis); **5** – climb; **6** – horizontal movement along axis from the point of water sampling to point B (see Fig. 1); **7** – landing

Выводы

В статье рассмотрено движение летательного аппарата – конвертоплана трикоптерного вида, которое описывается нелинейной и нестационарной моделью. Модели нестационарности связаны с неполнотой априорной и текущей информации о параметрах поведения внешней среды, а так же самого аппарата, которые затрудняют анализ и проектирование системы управления.

На основе ранее разработанных алгоритмов численного решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение трикоптера, предложено, использовать адаптивное управление движением ЛЛ с эталонной моде-

лью. Такой адаптор позволяет обеспечить сходимость к нулю ошибки слежения, т.е. разности между выходными сигналами и эталонной моделью.

Исследованы алгоритмы адаптивного управления, определены параметры регулятора, обеспечивающие качественные показатели САУ в заданных пределах по сравнению с традиционным PID регулятором. Предложенная система управления даёт хороший результат при небольших возмущающих воздействиях.

Полученные результаты позволяют строить и анализировать широкий класс адаптивных систем с эталонной моделью в нестационарных условиях.

Список литературы

1. Elbanna A. E. A. et al. Improved Design and Implementation of Automatic Flight Control System (AFCS) for a Fixed Wing Small UAV // Radioengineering. 2018. Vol. 27. № 3.
2. Sahwee Z. et al. Wind tunnel evaluation for control transition from elevator to stabilator of small UAV // J. Eng. Sci. Technol. 2017. Vol. 12. №. 6. P. 1617-1626.
3. Яцун С.Ф., Емельянова О.В, Казарян К.Г. Алгоритм управления беспилотным летательным аппаратом типа конвертоплан // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2016): труды третьего Всероссийского научно-практического семинара. Иннополис: Изд-во «Перо», 2016. С. 147-157.
4. Control fligth of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller / S. Jatsun, O. Emelyanova, Andres S. M. Leon, S. Stykanyova // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2017. С. 1-5.
5. Jatsun S., Emelyanova O., Leon A. S. M. Design of an Experimental Test Bench for a UAV Type Convertiplane // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 714. №. 1. P. 012009.

6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016615163 Российская Федерация. Управление полетом трикоптера-2016 / Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савин А.И. заявл. 25.03.2016; зарегистрировано 17.05.2016.
7. Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Ефимов С.В. Механизмы конвертопланов / под ред. В.А. Глазунова // Новые механизмы в современной робототехнике. М.: Техносфера, 2018. С. 247-267.
8. Исследование колебаний конвертоплана в вертикальной продольной плоскости / С.Ф. Яцун, Б.В. Лушников, О.В. Емельянова, С.П. Стуканева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 42-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-42-56>.
9. Modeling and control architecture of autonomous mobile aerial platform environmental monitoring. 4 International conference on information systems and computer science-2019 / S.F. Jatsun, S.V. Efimov, O.V. Emilyanova, A. S. Martinez Leon, P.J. Cruz Davalos // *Held io Quito-Ecuador*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9052260>.
10. Яцун С.Ф., Емельянова О. В., Савин А. И. Математическое моделирование конвертоплана с центрально расположенным управляемым приводом // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. №4(17). С. 31-37.
11. Emelyanova O.V., Kazaryan G.K., Martinez Leon A.S., Jatsun S.F. The synthesis of electric drives characteristics of the UAV of “convertiplane – tricopter” type/ MATEC Web Conf. Vol. 99, 2017 2016 Workshop on Contemporary Materials and Technologies in the Aviation Industry (CMTAI2016). <https://doi.org/10.1051/matecconf/20179902002>
12. Синтез параметров электроприводов БПЛА типа «конвертоплан–трикоптер / О.В. Емельянова, Г.К. Казарян, А.С. Мартинез Леон, С.Ф. Яцун, С.П. Стуканева // IV Международная школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2017: сборник трудов. М.:ИМАШ РАН, 2017. С.239-249.
13. Jatsun S. [et al.] Investigation of Oscillations of a Quadcopter Convertiplane in Transient Mode in the Vertical Longitudinal Plane // *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”*. Springer, Singapore, 2020. P. 345-358.
14. Пат. на полезную модель № 187784 U1 Российская Федерация, МПК В64С 27/08. Двигатель воздушный с изменяемым вектором тяги / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Мартинез Л.А.С., Емельянова О.В. № 2018147097 от 28.12.2018.
15. Сафаров Д. И., Емельянова О. В., Локтионова О. Г. Моделирование процесса движения частицы загрязнений в потоке жидкости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 4-2. С. 225-227.

16. Локтионова О. Г., Сафаров Д. И., Емельянова О. В. Исследование движения частицы в потоке жидкости при очистке сточных вод // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №. 2-1. С. 163-172.
17. Мартинез Леон А. С., Лушников Б. В., Яцун С. Ф. Реализация динамической модели квадрокоптера в среде SimMechanics / MATLAB с помощью функции CAD-транслятора Solid-Works // Cloud of Science. 2020. Т. 7. №. 2. С. 347-357.
18. Бураков М. В. Модификация адаптивной системы с эталонной моделью // Перспективные информационные технологии-2016: сборник трудов конференции. Самара, 2016. С. 205-208.
19. Томчина О. П. и др. Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента // Информационно-управляющие системы. 2019. № 3. С. 37-44.

References

1. Elbanna A. E. A. et al. Improved Design and Implementation of Automatic Flight Control System (AFCS) for a Fixed Wing Small UAV. *Radioengineering*, 2018, vol. 27, no. 3.
2. Sahwee Z. et al. Wind tunnel evaluation for control transition from elevator to stabilator of small UAV. *J. Eng. Sci. Technol*, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1617-1626.
3. Yacun S.F., Emel'yanova O.V., Kazaryan G.K. [Convertiplane unmanned aerial vehicle control algorithm] *Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta (BTS-II-2016). Trudy tret'ego Vserossiyskogo nauchno-prakticheskogo seminara*. [Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence (BTS-AI-2016). Proceedings of the third all-Russian scientific and practical seminar]. Innopolis, 2016, pp. 147-157 (In Russ).
4. Jatsun S., Emelyanova O., Andres S. M. Leon, Stykanyova S. Control flight of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller. 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2017, pp. 1-5. IEEE.
5. Jatsun S., Emelyanova O., Leon A. S. M. Design of an Experimental Test Bench for a UAV Type Convertiplane. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, vol. 714, no. 1, 012009 p.
6. Yatsun S.F., Emelyanova O.V., Savin A.I. *Upravlenie poletom trikoptera-2016* [Flight control trikoptera-2016]. Computer Program Registration Certificate № 2016615163 RF, 17.05.2016.
7. Yacun S.F., Emel'yanova O.V., Efimov S.V. [Mechanisms of convertiplane] *Novye mekhanizmy v sovremennoj robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018, pp. 247-267 (In Russ.).

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

9. Jatsun S.F., Efimov S. V., Emilyanova O.V., Martinez Leon A. S. Modeling and control architecture of autonomous mobile aerial platform environmental monitoring. 4 International conference on information systems and computer science-inciscos, 2019 held in Quito-Ecuador. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9052260>

10. Yacun S.F., Emel'yanova O.V., Savin S.I. Matematicheskoe modelirovanie konvertoplana s central'no raspolozhennym upravlyaemym privodom [Mathematical modeling of a tiltrotor with a centrally located controlled drive]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2015, no.4(17), pp. 31-37 (In Russ.)

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

12. Emel'yanova O.V., Kazaryan G.K., Martinez Leon A.S., Yacun S.F., Stukaneva S.P. [Synthesis of parameters of electric drives of UAV type" tiltrotor–tricopter] *IV Mezhdunarodnaya shkola-konferenciya molodyh uchenykh "Nelinejnaya dinamika mashin"* [IV international school-conference of young scientists "Nonlinear dynamics of machines"]. Moscow, 2017, pp. 239-249 (In Russ.).

13. Jatsun S. [et al.] Investigation of Oscillations of a Quadcopter Convertiplane in Transient Mode in the Vertical Longitudinal Plane. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 345-358.

14. Yatsun S.F., Mishchenko V.Y., Martinez A., Emelyanova O.V. *Dvizhitel' vozdukhnyy s izmenyaemym vektorom tyagi* [Air propulsor with variable thrust vector]. Patent for useful model RF. № 187784, 28.12.2018.

15. Safarov D. I., Emel'yanova O. V., Loktionova O. G. Modelirovanie processa dvizheniya chasticy zagryaznenij v potoke zhidkosti [Modeling of the process of movement of a particle of contamination in a liquid flow]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2, pp. 225-227 (In Russ.).

16. Loktionova O. G., Safarov D. I., Emel'yanova O. V. Issledovanie dvizheniya chasticy v potoke zhidkosti pri ochistke stochnyh vod [Investigation of particle movement in the liquid flow during wastewater treatment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2-1, pp. 163-172 (In Russ.).

17. Martinez Leon A. S., Lushnikov B. V., Yacun S. F. Realizaciya dinamicheskoy modeli kvadrokoptera v srede SimMechanics MATLAB s pomoshch'yu funkcii CAD-translyatora Solid-Works [Implementation of a dynamic model of a quadrocopter in the SimMechanics/ MATLAB environment using the Solid-Works CAD translator function]. *Cloud of Science*, 2020, vol. 7, no. 2. pp. 347-357 (In Russ).
18. Burakov M. V. [Modification of an adaptive system with a reference model]. *Perspektivnye informacionnye tekhnologii. Sbornik*. [Promising Information Technology-2016. Collection]. Samara, 2016, pp. 205-208 (In Russ)
19. Tomchina O. P. i dr. Adaptivnoe upravlenie nestacionarnymi nelinejnymi ob"ektami na osnove algoritmov skorostnogo gradienta [Adaptive control of non-stationary nonlinear objects based on velocity gradient algorithms]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy=Management Information Systems*, 2019, no. 3, pp. 37-44 (In Russ).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

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

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

Луис Мигель Москера Морочо, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Luis Miguel Mosquera Morocho, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Андрес Сантьяго Мартинез Леон, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: asml1992@yandex.ru

Andres Santiago Martinez Leon, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: asml1992@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-51-65>

Безабразивная доводка сопрягаемых поверхностей деталей машин комбинированными методами с наложением электромагнитных полей

Е. В. Смоленцев¹, М. В. Кондратьев¹, Е. В. Павлов²✉, В. В. Куц²

¹ Воронежский государственный технический университет
Московский пр. 14, г. Воронеж 394026, Российская Федерация

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

✉ e-mail: evp.kstu@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В различных отраслях машиностроения изготавливаются и используются краны, клапаны, задвижки и прочие запорные устройства, основным назначением которых является регулировка расхода и направление потоков жидкостных и газовых сред. Особенности таких изделий в авиакосмическом и нефтехимическом машиностроении являются особые повышенные требования, обусловленные спецификой их эксплуатации. К ним можно отнести, например, высокое давление среды, устойчивость к агрессивным, пожаро- и взрывоопасным средам, утечки которых недопустимы для соблюдения техники безопасности и экологического законодательства. Конструкция таких изделий, как правило, предполагает высокие требования по точности и шероховатости, особенно в местах сопряжения деталей, высокую прочность на случай ударных импульсных воздействий протекающих в них сред. Для обеспечения вышеуказанных характеристик наиболее часто используют чистовую абразивную обработку, результатом которой может стать эффект шаржирования поверхностей изделий, что негативно отразится на ресурсных и эксплуатационных показателях сопрягаемых поверхностей. При этом очевидно, что механическая отделочная обработка без применения абразивов крайне затруднительна и трудоемка. Авторами статьи предлагается для устранения негативного эффекта шаржирования использовать комбинированные методы обработки с наложением электромагнитных полей. **Цель работы:** создать технологию безабразивной доводки деталей машин за счет разработки модели, позволяющей подбирать или рассчитывать режимы изготовления безззорных сопрягаемых деталей запорных устройств, используемых в различных отраслях.

Методы. Методом исследования является использование научных основ комбинированных методов обработки, теории массового при электрической обработке, фундаментальные основы технологии машиностроения, современных методов исследования показателей на финишных этапах механической обработки, современных измерительных средств, специальных средств технологического оснащения, а так же вычислительной техники.

Результаты. В результате проведенных исследований были разработаны новые способ и устройства. Это дало возможность реализовать безабразивную доводочную операцию сопрягаемых поверхностей деталей из металлических материалов, обработка которых механическими методами затруднительна.

Заключение. В результате проведенных исследований стало возможно получить качественные высоко-ресурсные безззорные запорные изделия при снижении трудоемкости на доводочную операцию до 5 раз и подготовки производства до 2 раз.

Ключевые слова: безабразивная доводка; комбинированная обработка; электромагнитное поле.

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

Для цитирования: Безабразивная доводка сопрягаемых поверхностей деталей машин комбинированными методами с наложением электромагнитных полей / Е. В. Смоленцев, М. В. Кондратьев, Е. В. Павлов, В. В. Куц // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 51-65. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-51-65>.

Поступила в редакцию 23.04.2020

Подписана в печать 01.06.2020

Опубликована 30.06.2020

Non-abrasive Finishing of Mating Surfaces of Machine Parts Using Mixed Techniques with Electromagnetic Fields Application

Evgeniy V. Smolentsev ¹, Mikhail V. Kondratev ¹, Evgeniy V. Pavlov ² ✉, Vadim V. Kuts ²

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

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

✉ e-mail: evp.kstu@mail.ru

Abstract

In various branches of mechanical engineering, faucets, valves, gate valves and other shut-off devices are manufactured and used. Their main purpose is to regulate the flow rate and direction of flows of liquid and gas media. Features of such products in the aerospace and petrochemical engineering are special strict requirements due to the specificity of their operation. These include, for example, high pressure, resistance to aggressive, fire-and explosive environments, leaks of which are unacceptable according to safety rules and environmental legislation. The design of such products, as a rule, assumes high requirements for accuracy and roughness, especially at the interface of parts, high strength in case of impact pulse effects of the fluids in them. To ensure the above characteristics, finishing abrasive treatment is most commonly used, which can result in the effect of impregnation of the surfaces of products, which will negatively affect the useful life and performance indicators of the mating surfaces. At the same time, it is obvious that mechanical finishing without any use of abrasives is extremely difficult and time-consuming. The authors of the article suggest elimination of the negative effect of impregnation by means of mixed machining techniques with the application of electromagnetic fields.

Purpose. The purpose of the work is to develop a technology for non-abrasive finishing of machine parts by developing a model that allows selection or calculation of the production modes of gapless mating parts of locking devices applied in various industries.

Methods. The method of the research is the use of the scientific basis of mixed machining techniques, the theory of mass transfer in electrical machining, the fundamental foundations of mechanical engineering technology, modern methods for studying characteristics at the final stages of machining, modern measuring tools, special technological equipment, as well as computer technologies.

Results. As a result of the research, new technique and devices were developed. This made it possible to implement a non-abrasive finishing operation of the mating surfaces of parts made of metal materials, the processing of which by mechanical methods is difficult.

Conclusion. As a result of the conducted research, it became possible to obtain high-quality high-resource gapless locking products and to reduce labor intensity of the finishing operation up to 5 times and preparation for the production up to 2 times.

Keywords: abrasive-free finishing; mixed treatment; electromagnetic field.

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

For citation: Smolentsev E. V., Kondratev M. V., Pavlov E. V., Kuts V. V. Non-abrasive Finishing of Mating Surfaces of Machine Parts Using Mixed Techniques with Electromagnetic Fields Application // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 51-65 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-51-65>.

Received 23.04.2020

Accepted 01.06.2020

Published 30.06.2020

Введение

Практически повсеместно в машиностроении изготавливаются и используются запорные устройства, предназначенные для регулировки потоков жидкостных и газовых сред¹. Наиболее распространенными из них являются краны, клапаны, задвижки. Особенности таких изделий в авиакосмическом и нефтехимическом машиностроении являются особые повышенные требования, обусловленные спецификой их эксплуатации. К ним можно отнести, например, высокое давление среды, устойчивость к агрессивным, пожаро- и взрывоопасным средам, утечки которых недопустимы для соблюдения техники безопасности и экологического законодательства. Конструкция таких изделий, как правило, предполагает высокие требования по точности и шероховатости,

особенно в местах сопряжения деталей, высокую прочность на случай ударных импульсных воздействий протекающих в них сред. Для обеспечения вышеуказанных характеристик наиболее часто используют чистовую абразивную обработку, результатом которой может стать эффект шаржирования поверхностей изделий, что негативно отразится на ресурсных и эксплуатационных показателях сопрягаемых поверхностей. При этом очевидно, что механическая отделочная обработка без применения абразивов крайне затруднительна и трудоемка. Авторами статьи предлагается для устранения негативного эффекта шаржирования использовать комбинированные методы обработки с наложением электромагнитных полей [1].

С учетом вышеизложенного авторами была поставлена **цель исследования**: создать технологию безабразивной доводки деталей машин за счет разработки модели, позволяющей подбирать или рассчитывать режимы изготовления беззачерновых сопрягаемых деталей за-

¹ Клименченков А. А. Разработка технологии безабразивной комбинированной прецизионной обработки сопрягаемых поверхностей: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2015.

порных устройств, используемых в различных отраслях.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- формализовать взаимосвязи показателей поверхностного слоя сопрягаемых деталей запорных устройств и технологических режимов комбинированных отделочных методов обработки с наложением электромагнитных полей;

- создать модель удаления микро- и макронеровностей на сопрягаемых поверхностях деталей и, на основе ее, разработать методику расчета технологических режимов, позволяющих достичь заданные в конструкции эксплуатационные требования;

- спроектировать типовые технологические процессы для конкретных, наиболее распространенных материалов и конструкций изделий запорной арматуры в нефтегазовой и аэрокосмической отраслях;

- спроектировать и реализовать конструкции средств технологического оснащения, которые бы позволили реализовать предлагаемую технологию, в том числе и в условиях серийного производства.

Для решения вышеуказанных задач были выдвинуты следующие научные гипотезы:

- достижение требуемой минимальной величины микро- и макронеровностей обрабатываемых деталей реализуемо, если использовать схему комбинированной безазорной обработки с удалением оксидных пленок в контактной

зоне обработки механическим способом, при этом управляя электрическим полем;

- для получения управляемого электрического поля можно вести обработку при низких напряжениях, дозировано подавая ток в зону обработки в процессе перемещения притираемых деталей. Скорость удаления металла будет определяться силой подаваемого тока;

- обоснованное соотношение механического воздействия и эффекта от наложения электромагнитного поля позволит достичь качества обработки, обеспечивающего высокий ресурс с достижением герметичности сопряжений за счет исключения негативного эффекта шаржирования;

- математическое и натурное моделирование процесса безабразивной отделочной обработки даст возможность с необходимой точностью оценить технико-экономические показатели проектируемой технологии и их соответствие требованиям заказчиков, особенно при разработке конкурентоспособной продукции новых поколений.

Материалы и методы

В поисках решений и методов исследований было установлено, что запорные устройства можно изготавливать с чистовыми операциями без применения абразивов за счет поэтапного удаления припуска на микро- и макроуровнях комбинированной обработкой с наложением электромагнитного поля [2].

На первом этапе происходит эрозионно-химическое удаление макро- и микронеровностей со съемом выступов

за счет, в основном, анодного растворения металла с вершин неровностей обеих сопрягаемых поверхностей (рис. 1).

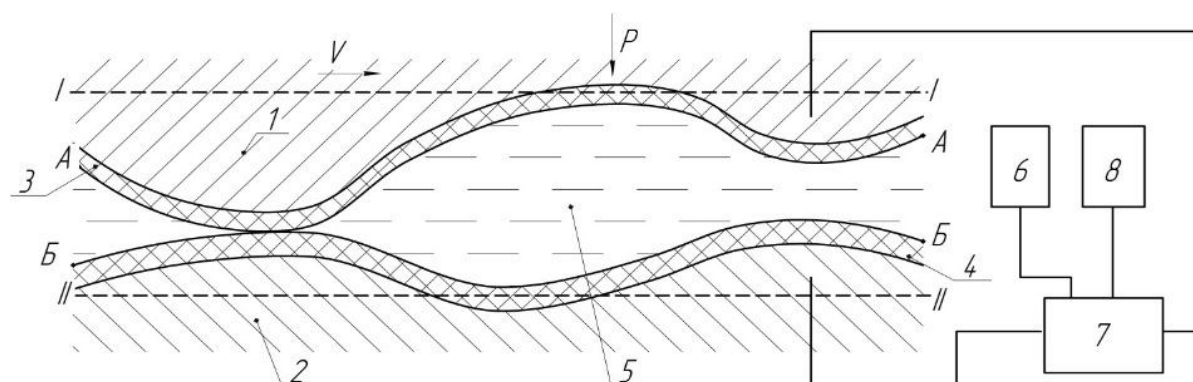


Рис. 1. Схема реализации обработки

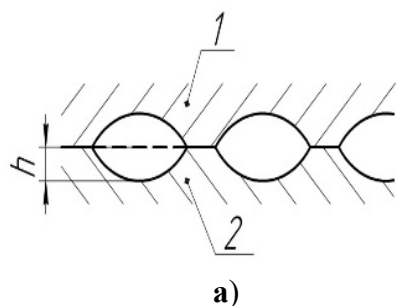
Fig. 1. Processing diagram

Как видно из представленной схемы, сопрягаемые обрабатываемые детали 1 и 2 до начала процесса должны быть собраны в рабочее положение в узле и подключены к электроэрозионному генератору импульсов 6 (например, RC, как на вышеуказанной схеме) и источнику тока 8. Зазор между обрабатываемыми поверхностями должен быть заполнен жидким электролитом 5. Затем на детали подают электрический ток и прикладывают давление P . Под действием процессов, происходящих в межэлектродном зазоре, на поверхностях, находящихся в электролите, образуются оксидные пленки 3 и 4. Под действием давления P рабочие поверхности анода и катода сближаются вплоть до расстояния, равного сумме толщин оксидных пленок, и начинается

процесс удаления металла за счет действия электромагнитных полей в электролите [3, 4]. Так как процесс будет происходить на участках, где межэлектродный зазор минимален (то есть там, где макронеровности от предшествующей обработки максимальные), то в конце первого этапа обрабатываемые поверхности должны быть максимально приближены к профилю, показанному на рис. 1 границами I-I и II-II, что и требуется в данном случае [5-7].

После выравнивания макронеровностей необходимо решить задачу по снижению шероховатости сопрягаемых деталей. Из литературы, например [8-12], известно, что результатом воздействия электроэрозионной обработки является формирование микронеровностей, имеющих форму, близкую к геометрии сфе-

рических лунок (рис. 2). На рисунке показано, что лунки с диаметром $d_{\text{л}}$ и высотой h , получающиеся электроискровыми разрядами, могут формировать шероховатость со значением от R_{zo} с последующим ее снижением на этом же этапе до



величины наноуровня R_z за счет наложения границ впадин друг на друга и электрохимического воздействия. Управление процессом формирования микрорельефа может осуществляться по времени обработки [13-16].

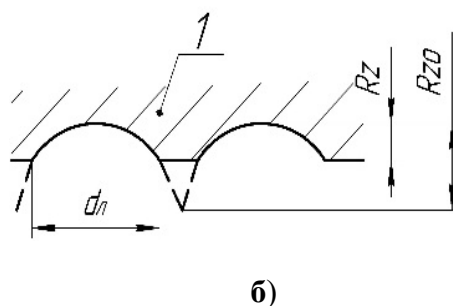


Рис. 2. Микрогеометрия обрабатываемых деталей после первого этапа обработки:

а – приближенное состояние геометрии в зоне сопряжения поверхностей 1 и 2;

б – изменение параметра шероховатости лунки после первого этапа обработки

Fig. 2. Microgeometry of workpieces after the first stage of processing: **a** – approximate state of geometry in the mate area of surfaces 1 and 2; **б** – change of the roughness parameter of the hole after the first stage of processing

Заключительным этапом обработки является снижение высоты микрорельефа R_z за счет анодного растворения при переменной полярности, за счет чего достигается синхронное растворение обеих обрабатываемых поверхностей. За счет малой величины напряжения межэлектродный зазор, равный сумме толщин оксидных пленок, позволяет вести обработку без коротких замыканий. Металл в процессе обработки удаляется на участках, где зазор наименьший, то есть в местах сопряжения лунок, сформировавшихся на предшествующем этапе [17-21].

Результаты и их обсуждение

Результатом исследований стало создание методики расчета технологи-

ческих режимов комбинированной обработки.

Диаметр зоны, на которую действует разряд для чистовой электроэрозионной обработки, может быть аппроксимирован диаметром лунки $d_{\text{л}}$. Для его определения была предложена следующая зависимость:

$$d_{\text{л}} = K_0 \cdot \left(\frac{A_u}{\tau_u} \right)^m \tau_u^n, \quad (1)$$

$$\text{где } K_0 = \frac{L}{S(m - 0,5n) + 0,5n}. \quad (2)$$

В формулах (1),(2) L , K_0 , m , n – эмпирические коэффициенты;

S – зазор между электродами, определяемый толщиной оксидной пленки; A_u – энергия электрического импульса. Для RC схемы генератора импульсов

$$A_u = \eta_1 \frac{CU^2}{2}.$$

Здесь η_1 – коэффициент полезного использования электрической энергии. По [5] $\eta_1 \leq 0,4$; C – емкость конденсаторов генератора импульсов; U – электрическое напряжение на электродах (в данном случае, при сверхмалых зазорах величина $U=10-20\text{В}$); τ_u – длительность протекания импульса.

$$\tau_u = \frac{1}{qf}, \quad (3)$$

где q – коэффициент, определяющий скважность импульсов, определяемый как отношение периода их повторения к длительности. В данном случае его значение находится в диапазоне от 2 до 10 (уточняется экспериментально); f – частота следования электрических импульсов. Приблизительно можно определить $f = 0,837/RC$ (R – регулируемое сопротивление в случае использования RC – генератора).

Для того, чтобы определить энергию импульса требуется установить значение величины минимального зазора между электродами («S» в (2)), который напрямую зависит от толщины слоя оксидной пленки. Данная пленка образуется под воздействием электрического тока и обладает свойствами, близкими к полупроводниковым материалам. Толщина оксидной пленки (H) будет зависеть от свойств обрабатываемого металла и в классическом случае выражается через такие величины, как энергия разряда (Au), температура (T) и постоянная Больцмана $\bar{R}$.

$$H = K_n \cdot e^{-Au/\bar{R}T} \cdot \tau_u, \quad (4)$$

где K_n – коэффициент, позволяющий учитывать скорость увеличения толщины пленки с учетом свойств обрабатываемого материала.

По справочным данным толщина оксидных пленок для сплавов на основе никеля составляет не более 15-30 нм, а у материалов на основе титана – до 50-60 нм. Соответственно, межэлектродный зазор (S) будет на уровне этих величин и для того, чтобы произошел пробой в промежутке достаточно величины напряжения менее 10 В. Исследование с осциллографом показало, что при такой величине напряжения можно достичь тлеющих разрядов, которые не вызывают образования лунок. Таким образом, относительное перемещение сопрягаемых поверхностей обрабатываемых деталей под сжимающим давлением позволяет уменьшить толщину пленки и получить локализованные участки с проводимостью, где необходимо формировать микроразряды.

С учетом формулы (1) можно оценить глубину лунки h (рис. 2) по зависимости

$$h = Kh \cdot d_{\text{л}}, \quad (5)$$

Для сталей коэффициент $Kh = 0,25-0,35$.

Величина « h » ограничена значением припуска (Z_o) под окончательную обработку

$$h < Z_o - \delta, \quad (6)$$

где δ – погрешность после первого этапа доводки. Известно, что эта величина составляет 3-4 мкм. Таким образом, при-

пуск на окончательный этап обработки составит $Z_0 = h + \delta$ и его величина не превысит 5-6 мкм.

Зная глубину лунки можно вычислить величину R_z (рис. 2), значение которой определяет анодная составляющая процесса обработки (рис. 1) и появление в межэлектродном пространстве частиц металла, удаляемого электроэрозионным методом. Уровень их накопления, в свою очередь, зависит от площади сопрягаемых обрабатываемых участков, скорости взаимного перемещения поверхностей деталей, значений режимов электроэрозионной обработки [5].

Процесс анодного растворения (рис. 1) позволяет выравнивать микроповерхность при чистовых режимах комбинированной обработки, способствует снижению высоты неровностей на 20-30%, что учитывается коэффициентом $K_2 = 0,7-0,8$.

Величина припуска R_{z0} , определяемая без учета влияния частиц в межэлектродном промежутке и анодной составляющей комбинированной обработки (рис. 2,б), может быть определена по эмпирической формуле.

$$R_{z0} = \frac{\beta^2 \left(\frac{dl}{2} \right)^3 K_h}{3dl^2 \left(K_h^2 + \frac{1}{2} \right)}, \quad (7)$$

где β – коэффициент, учитывающий перекрытие лунки $\beta = \frac{dl}{l}$ (l – величина расстояния между двумя соседними лунками). По результатам экспериментов на чистовом этапе комбинированной обработки $\beta = 0,7-0,8$.

Если учитывать воздействие микрочастиц, а также анодную составляющую процесса обработки, то высота микронеровностей R_z (рис. 2, б) может быть определена по следующей зависимости

$$R_z = R_{z0} \cdot K_1 \cdot K_2 = \frac{\beta^2 K_h dl}{12 \left(K_h^2 + \frac{1}{2} \right)} \cdot K_1 K_2. \quad (8)$$

Для случая сплавов на базе железа и меди можно утверждать, что закон изменения размеров лунки близок к линейному и при максимальной концентрации частиц увеличение R_z может быть учтено постоянным коэффициентом K_1 (для сталей $K_1 = 1,15-1,16$, для алюминиевых сплавов $K_1 = 1,55-1,6$, для медных сплавов $K_1 = 1,25-1,3$).

Исходя из этого можно определить значение емкости конденсаторов (C) в случае обработки с применением генератора RC-схемы

$$C = \left(\frac{R_z}{K_3 U} \right)^3, \quad (9)$$

где K_3 – коэффициент.

Если принять форму микрочастиц сферической, то при заполнении ими межэлектродного пространства с значением концентрации φ время цикла очистки пространства τ_0 определяется по формуле

$$\tau_0 = \frac{V_l \cdot \varphi}{(a + bC) U K_1 K_2 K_4}, \quad (10)$$

где V_l – объем лунки на поверхности; a, b, K_4 – коэффициенты. Здесь K_4 позволяет учитывать условия обработки, такие как рабочая среда, частота следования рабочих электрических импульсов, схема комбинированной обработки,

φ – отражает степень наполнения лунки с глубиной h продуктами обработки-частицами металла. Для частиц сферической формы $\varphi = 0,6-0,7$.

Момент изменения полярности (τ_1) для электрохимической и электроэрозионной составляющих комбинированной обработки зависит от времени, за которое произойдет очистка пространства между электродами, и величины неровностей на каждой сопрягаемой поверхности перед этапом притирки. Если эти показатели близки, то

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \tau_0 = \frac{V_{л \cdot \varphi}}{(a+bC)UK_1K_2K_4}. \quad (11)$$

Исходя из этого, оценить скорость относительного перемещения контактных поверхностей деталей, необходимую для удаления продуктов из зазора, можно по зависимости

$$V \geq \frac{L_{л}(a+bC)UK_1K_2K_4}{V_{л \cdot \varphi}}. \quad (12)$$

Давление, с которым необходимо прижимать сопрягаемые детали (P на рис.1) возможно регулировать по величине силы тока между их контактными поверхностями. Для стабильности протекания электроэрозионной обработки необходимо обеспечить среднюю плотность тока (j) не менее $0,01 \text{ А/мм}^2$. Силу тока можно оценить исходя из площади контактирующих поверхностей (F_k):

$$I = j \cdot F_k. \quad (13)$$

На окончательном этапе доводки обработка идет за счет анодного растворения при переменном токе с величиной напряжения 3-4 В от источника тока 8 (рис. 1). Диаметр частиц, образу-

ющихся после обработки при доводочных режимах, не превышает 1000 нм, а их суммарный объем в 150-200 раз больше объема удаленного припуска.

Если условно принять суммарный объем продуктов обработки (гидрооксидов, газа и паров жидкости) в пространстве между образовавшимися лунками как $2 \cdot V_{л}$, то перед этапом доводки объем (V_M) удаляемого с поверхности детали металла не может быть больше, чем

$$V_M = \frac{2V_{л}}{\varphi_1}, \quad (14)$$

где φ_1 – соотношение объема продуктов обработки в лунке и объема удаляемого металла вблизи лунки ($\varphi_1 = 150-200$).

По ходу выравнивания профиля микроповерхности (рис. 2,б) объемы лунок будут уменьшаться, а высота неровностей (R_z) снижаться до 20-30 нм. Из формулы (14) можно сделать вывод, что скорость процесса анодного растворения ближе к концу доводки будет измеряться нанометрами за единицу времени, а контролируемый параметр – время процесса обработки (τ_s) – для обеих сопрягаемых поверхностей деталей составит

$$\tau_s = \frac{\gamma_m \varphi_2 (R_{zH} + \delta_H) [\varphi_2 (R_{zH} + \delta_H) + 2R_{zH}]}{\eta \alpha \chi (U - \Delta U)}, \quad (15)$$

где γ_m – плотность обрабатываемого металла; φ_2 – коэффициент, позволяющий учитывать скорость выравнивания профиля поверхности в случае неравномерного припуска. Для финишного этапа доводки $\varphi_2 = 1,1-1,2$; R_{zH} – высота неровностей; после начального этапа доводки по справочным данным $R_{zH} = 0,8-3,2 \text{ мкм}$; δ_H – погрешность в

начале второго этапа доводки, по справочным данным составляет 0,1-1,0 мкм; η – выход по току. Для сверхмалых зазоров η на 10-20% меньше, чем приведено в справочных рекомендациях. χ – удельная проводимость рабочей среды α – электрохимический эквивалент обрабатываемого металла. В том случае, когда обработка ведется в промышленной воде, можно задать электропроводимость для концентрации солей около 1%. U – напряжение на электродах-

инструментах. В данном рассматриваемом случае выбирают $U = 3-4$ В. ΔU – потери электрического напряжения (главным образом – омические в межэлектродном пространстве). При небольших зазорах потери напряжения составляют $\Delta U = 1-2,2$ В. Длительность протекания финишного этапа доводки может достигать десятков минут (рис. 3), при этом длительность начального этапа не превышает 1-2 минуты.

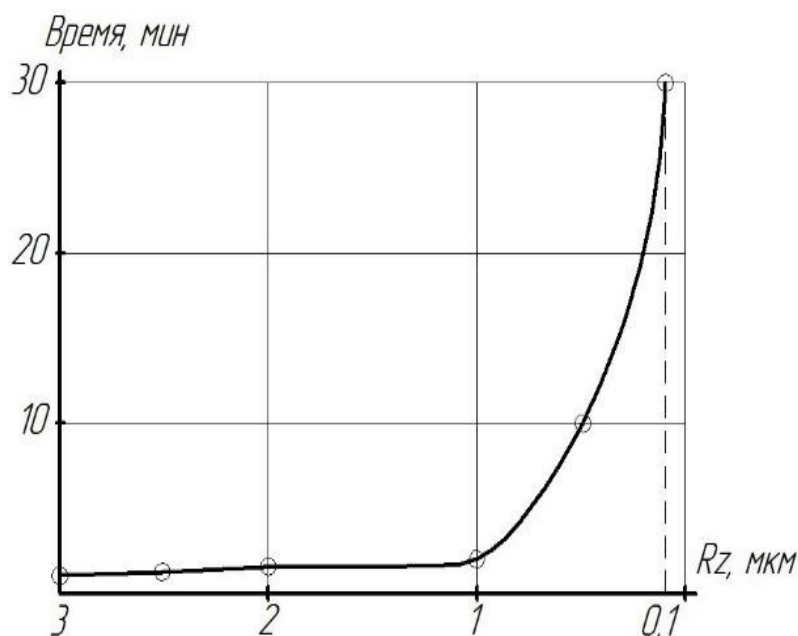


Рис. 3. Зависимость времени обработки и шероховатости в процессе комбинированной обработки (площадь 100 мм²)

Fig. 3. Dependence of processing time and roughness during combined machinery (area -100 mm²)

Выводы

Выполненная авторами работа позволила создать новый способ обработки и устройство для его реализации. Применение комбинированных методов с наложением электромагнитных полей дает возможность снизить трудоемкость чи-

стовой обработки высокоточных ответственных деталей запорной арматуры до 5 раз и повысить ее ресурс до 2-3 раз. Так же новый способ обработки позволяет снизить расходы на специальное оборудование для механической обработки и, в ряде случаев, восстанавливать ресурс изношенных деталей.

Список литературы

1. Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 5-9.
2. Комбинированные методы повышения качества поверхностного слоя материалов / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов, Е.В. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2017. №1 (321). С. 90-97.
3. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Механизм и процессы комбинированного нанесения покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. №3. С.90-97.
4. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Процесс эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. №3. С.107-115.
5. Формирование химико-механических покрытий для опорных поверхностей сопрягаемых деталей / Иванов В.В., Бабичев А.П., Смоленцев В.П., Кондратьев М.В. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 9 (153). С. 427-430.
6. Клименченков А.А., Смоленцев Е.В. Формирование микро- и нанопрофиля сопрягаемых поверхностей при комбинированной обработке // Наноинженерия. 2013. №7. С. 8-15.
7. Ryazantsev A., Yukhnovich S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces / MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 224, 01058 (2018). DOI: 10.1051/matecconf/201822401058
8. Shirokzhukhova A., Ryazantsev A., Gritsyuk V. Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19, pt. 5. P. 2065-2067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075>
9. Zhu D., Wang K., N.S. Qu Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – Manuf Technol, 2007. 56 (1). P. 241–244.
10. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach Int J Adv Manuf Technol, 2011. 53. P. 181–190.
11. Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy / Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Chinese // Journal of Aeronautics. February 2013. Vol. 26, is. 1. P. 224–229.
12. Смоленцев В.П., Иванов В.В., Кондратьев М.В. Обобщенная критериальная модель комбинированной химико-механической обработки // Вестник БГТУ. 2017. № 2.
13. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Создание гибких технологических процессов на базе комбинированных методов обработки // Конструктивные особенности и техно-

логия изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения Воронеж: ВМЗ. 2014. С. 132-136.

14. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Особенности проектирования технологических процессов при низкочастотной импульсной обработке // Современные технологии производства в машиностроении: сборник научных трудов. Воронеж: ВГТУ, 2015. №9. С. 92-94.

15. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Методика расчёта инструмента с непрофилированной рабочей частью // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, №5. С. 4 – 8.

16. Рязанцев А.Ю., Баркалов М.В. Использование комбинированных методов обработки при экспериментальной отработке изделий ракетно – космической техники // Сборник статей VI научно – технической конференции молодых ученых и специалистов Центра управления полетами. Королев: ЦНИИМаш, 2016. С. 42 – 48.

17. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Расширение области использования комбинированных процессов обработки непрофилированным электродом-щеткой // Вестник Рыбинского авиационного технического университета имени А.П. Соловьева. 2017. №2 (41). С. 15 – 20.

18. Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Перспективы применения комбинированных методов обработки при изготовлении ЖРД // Тезисы докладов XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Королев: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2017. Т. 1. С. 137 – 138.

19. Повышение износостойкости и контактной долговечности коленчатых валов / Е.В. Павлов, С.В. Дегтярев, А.П. Кузьменко, О.Г. Локтионова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 1. С. 28-31.

20. Павлов Е.В. Установление зависимости параметров механической обработки на показатели качества деталей с покрытиями // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1. С. 82-84.

21. Павлов Е.В., Локтионова О.Г., Яцун С.Ф. Совершенствование технологии восстановления изделий с применением обработки инструментами, оснащенными сверхтвёрдыми материалами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1. С. 120-127.

References

1. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya kombinirovannykh metodov obrabotki [Status and development prospects of combined processing methods]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva = Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov*, 2017, no. 2 (41), pp. 5-9 (In Russ.).

2. Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Ivanov V.V., Smolentsev E.V. Kombinirovannyye metody povysheniya kachestva poverkhnostnogo sloya materialov [Combined methods for improving the quality of the surface layer of materials]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2017, no. 321, pp. 90-97 (In Russ.).
3. Kondratiev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. Mekhanizm i protsessy kombinirovannogo naneseniya pokrytii [The mechanism and processes of combined coating]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017, no.3, pp.90-97 (In Russ.).
4. Kondratiev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. Protsess erozionno-luchevogo plazmennogo naneseniya iznosostoikikh pokrytii [The process of erosion-beam plasma deposition of wear-resistant coatings]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017, no.3, pp.107-115 (In Russ.).
5. Ivanov V.V., Babichev A.P., Smolentsev V.P., Kondratyev M.V. Formirovanie khimiko-mekhanicheskikh pokrytii dlya opornykh poverkhnostei sopryagaemykh detalei [Formation of chemical-mechanical coatings for the supporting surfaces of mating parts]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening Technologies and Coatings*, 2017, no. 9 (153), pp. 427-430 (In Russ.).
6. Klimenchenkov A.A., Smolentsev E.V. Formirovanie mikro i nanoprofil'nykh sopryagaemykh poverkhnostei pri kombinirovannoi obrabotke [The formation of micro and nano-profiles of mating surfaces during combined processing]. *Nanoinzheneriya = Nanoengineering*, 2013, no.7, pp. 8-15 (In Russ.).
7. Ryazantsev A., Yukhnovich S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces. MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 224, 01058 (2018). DOI: 10.1051/matecconf/201822401058.
8. Shirokzhukhova A., Ryazantsev A., Gritsyuk V. Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pt. 5, pp. 2065-2067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075>
9. Zhu D., Wang K. N.S. Qu Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – *Manuf Technol*, 2007, no. 56 (1), pp. 241–244.
10. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process–RSM approach *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 53, pp. 181–190.
11. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy Chinese. *Journal of Aeronautics*, February 2013, vol. 26, is. 1, pp. 224–229.
12. Smolentsev V.P., Ivanov V.V., Kondratyev M.V. Obobshchennaya kriterial'naya model' kombinirovannoi khimiko-mekhanicheskoi obrabotki [A generalized criterial model

of combined chemical-mechanical processing]. *Vestnik BGTU = Bulletin of BSTU*, 2017, no. 2 (In Russ.).

13. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. [Creation of flexible technological processes based on combined processing methods]. *Konstruktivnye osobennosti i tekhnologiya izgotovleniya detalei raketnykh dvigatelei novogo pokoleniya* [Design features and manufacturing technology of parts for new generation rocket engines]. Voronezh, 2014, pp. 132-136 (In Russ.).

14. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. [Features of the design of technological processes in low-frequency pulsed processing]. *Sbornik nauchnykh trudov "Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii"* [Collection of scientific papers "Modern production technologies in mechanical engineering"]. Voronezh, 2015, no. 9, pp. 92-94 (In Russ.).

15. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. Metodika raschet instrumenta s neprofiliro-vannoi rabochei chast'yu [Methodology tool calculation with an unprofiled working part]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2015, vol., 11, no.5, pp. 4 – 8 (In Russ.).

16. Ryazantsev A.Yu., Barkalov M.V. [The use of combined processing methods in the experimental development of rocket and space technology products]. *Sbornik statei VI nauchno – tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Tsentra upravleniya poletami* [Collection of articles of the VI scientific and technical conference of young scientists and specialists of the Mission Control Center]. Korolev, 2016, pp. 42 – 48 (In Russ.).

17. Ryazantsev A.Yu., Kirillov O.N. Rasshirenie oblasti ispol'zovaniya kombinirovannykh protsessov obrabotki neprofilirovannym elektrodom-shchetkoi [Expanding the field of use of combined processing processes with a non-profiled electrode-brush]. *Vestnik Rybinskogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta imeni A.P. Solov'eva = Bulletin of the Rybinsk Aviation Technical University named after A.P. Solovieva*, 2017, no. 2 (41), pp. 15 – 20 (In Russ.).

18. Ryazantsev A.Yu., Yukhnovich S.S. [Prospects for the use of combined processing methods in the manufacture of liquid propellant rocket engine]. *Tezisy dokladov XXI nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Abstracts of the XXI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists]. Korolev, 2017, vol. 1, pp. 137 – 138 (In Russ.).

19. Pavlov E.V., Degtyarev S.V., Kuzmenko A.P., Loktionova O.G. Povyshenie iznosostoikosti i kontaknoi dolgovechnosti kolenchatykh valov [Increasing wear resistance and contact durability of crankshafts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2013, no.1, pp. 28-31 (In Russ.).

20. Pavlov E.V. Ustanovlenie zavisimosti parametrov mekhanicheskoi obrabotki na pokazateli kachestva detalei s pokrytiyami [Establishing the dependence of mechanical processing parameters on the quality indicators of parts with coatings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no.1, pp. 82-84 (In Russ.).

21. Pavlov E.V., Loktionova O.G., Yatsun S.F. Sovershenstvovanie tekhnologii voss-tanovleniya izdelii s primeneniem obrabotki instrumentami, osnashchennymi sverkh-tverdymi materialami [Improvement of technology for restoring products with the use of processing tools equipped with superhard materials]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no.1, pp. 120-127 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Смоленцев Евгений Владиславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8747-588X>

Evgeniy V. Smolentsev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department Engineering Technology, Voronezh State Technical Univesity, Voronezh, Russian Federation, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8747-588X>

Кондратьев Михаил Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированное оборудование машиностроительных производств», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: 540520@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>

Mikhail V. Kondratev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department Automated Equipment for Machine Building, Voronezh State Technical Univesity, Voronezh, Russian Federation, e-mail: 540520@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>

Павлов Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология, управление качеством, технология и дизайн», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evp.kstu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-3525>

Evgeniy V. Pavlov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department Standardization, Metrology, Quality Management, Technology and Design», Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evp.kstu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-3525>

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department Machine-building technologies and equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-66-78>

Моделирование экзоскелета с гибридным линейным гравитационным компенсатором

А.Е. Карлов¹, А.А. Постольный¹, А.В. Федоров¹, С.Ф. Яцун¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка математической модели экзоскелета, оснащенного гибридным линейным гравитационным компенсатором (ГЛГК), проведения динамического анализа на примере типового сценария применения экзоскелета – в процессе подъема груза, получении временных закономерностей изменения параметров системы, в том числе крутящих моментов электроприводов, позволяющих оценить энергопотребление и энергоэффективность силовой установки. В статье рассматривается актуальная задача повышения эффективности функционирования экзоскелетного костюма за счет использования ГЛГК. Использование гибридного подхода позволяет повысить эффективность ассистирования экзоскелетного костюма при выполнении различных технологических операций, например, при подъеме груза, при наклонах и удержании.

Методы. При разработке математической модели использовался оригинальный подход к формированию траектории движения звеньев экзоскелета в процессе работы, основанный на применении полиномов седьмого порядка. В работе используется математическая модель, представленная системой дифференциальных уравнений второго порядка, связывающей между собой моменты, действующие на оператора и экзоскелет, угловые ускорения спины оператора и экзоскелета.

Результаты. В ходе численного моделирования получены временные диаграммы изменения параметров системы, углов поворота шарниров экзоскелета, моментов, возникающих в гибридном ЛГК, а также графики токопотребления двигателей при выполнении подъема и наклонов с грузом.

Заключение. В ходе исследований была разработана кинематическая модель экзоскелетного костюма, оснащенная ГЛГК, записаны дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие динамическое поведение электромеханической системы, выполнено численное моделирование, позволившее оценить усилия и энергопотребление в шарнирах экзоскелета и приводе гибридного линейного гравитационного компенсатора.

Ключевые слова: экзоскелет; гравитационная компенсация; математическое моделирование; динамический анализ; кинематическая схема, ГЛГК.

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

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-27001.

Для цитирования: Моделирование экзоскелета с гибридным линейным гравитационным компенсатором / А.Е. Карлов, А.А. Постольный, А.В. Федоров, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 66-78. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-66-78>.

Поступила в редакцию 30.03.2020

Подписана в печать 12.05.2020

Опубликована 30.06.2020

© А.Е. Карлов, А.А. Постольный, А.В. Федоров, С.Ф. Яцун, 2020

Simulation of an Exoskeleton with a Hybrid Linear Gravity Compensator

Andrei E. Karlov¹, Andrei A. Postolny¹, Andrei V. Fedorov¹, Sergei F. Jatsun¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a mathematical model of an exoskeleton equipped with a hybrid linear gravity compensator (HLGC), dynamic analysis on the example of a typical exoskeleton application scenario (in the process of lifting a load), obtaining time patterns of changes in system parameters, including electric drive torques allowing assessment of power plan power consumption and energy efficiency. The article deals with the challenging issue of improving the efficiency of the exoskeletal suit by means of HLG. The use of a hybrid approach makes it possible to increase the efficiency of assisting the exoskeletal suit when performing various technological operations, for example, when lifting a load, when tilting and holding.

Methods. When developing a mathematical model, an original approach was used to form the motion trajectory of the exoskeleton sectors during operation, based on the use of seventh-order polynomials. The paper uses a mathematical model represented by a system of second-order differential equations that connects the moments acting on the operator and the exoskeleton, the angular accelerations of the operator's back and the exoskeleton.

Results. During numerical simulation, time diagrams of changes in system parameters, angles of rotation of exoskeleton hinges, moments that occur in a hybrid LGC, as well as graphs of current consumption of engines when performing lift and tilt with a load are obtained.

Conclusion. In the course of the research, a kinematic model of an exoskeleton suit equipped with a GLGC was developed, second-order differential equations describing the dynamic behavior of the electromechanical system were written, and numerical simulation was performed to estimate the forces and energy consumption in the exoskeleton hinges and the drive of the hybrid linear gravity compensator.

Keywords: exoskeleton; mathematic simulation; dynamic analysis; gravity compensation; kinematic scheme; hybrid linear gravity compensator.

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 as a part of the research project № 19-31-27001.

For citation: Karlov A. E., Postolny A.A., Fedorov A.V., Jatsun S. F. Simulation of an Exoskeleton with a Hybrid Linear Gravity Compensator // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 66-78 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-66-78>.

Received 30.03.2020

Accepted 12.05.2020

Published 30.06.2020

Введение

Одним из путей повышения качества условий труда является приме-

ние экзоскелетов, которые существенно увеличивают силовые возможности человека, при этом уровень функциональ-

ного напряжения организма снижается. Этот эффект достигается в том случае, когда оператор и экзоскелет образуют интегрированную человеко-машинную систему (ЧМС), работоспособность которой определяется степенью согласованности (синхронности) работы элементов этой системы, в том числе, человека (оператора) и экзоскелета. Сравнительно недавно начались разработки роботизированных систем, в том числе экзоскелетных человеко-машинных систем, в которых находят применение элементы гравитационной компенсации. Термин «гравитационная компенсация» используется для обозначения свойства отдельных звеньев системы иметь статически устойчивые положения, не зависящие от вертикального перемещения звеньев. Различают пассивную гравитационную компенсацию, реализуемую за счет применения упругих элементов для создания сил, компенсирующих силу тяжести, и активную гравитационную компенсацию, выполненную на основе управляемых приводов. Механизмы, содержащие упругие элементы для создания сил, компенсирующих силу тяжести, отличаются высокой энергоэффективностью, надежностью работы. К недостаткам подобных систем можно отнести структурную сложность и уменьшение размеров рабочего пространства механизма. Механизмы, использующие электроприводы, также демонстрируют свойство сохра-

нять статическое равновесие, то есть гравитационную компенсацию вне зависимости от текущего положения их звеньев, также находят применение в системах гравитационной компенсации. В этом случае, система управления позволяет реализовать такое движение приводов, что часть звеньев экзоскелета находится в положении равновесия, независимо от их вертикального перемещения. Представляет интерес объединить эти два подхода, что позволяет повысить эффективность системы гравитационной компенсации экзоскелета, сочетая возможности упругого элемента и управляемого электропривода. Такой гравитационный компенсатор получил название гибридный линейный гравитационный компенсатор (ГЛГК).

Материалы и методы

Рассмотрим кинематическую схему экзоскелетного костюма, оснащенного ГЛГК, для нижних конечностей (рис. 1).

Движение ГЛГК определяется перемещением точек A и B , положение которых в пространстве OXY задается радиус - векторами $\vec{r}_A^{(0)}$ и $\vec{r}_B^{(0)}$.

Положение в сагиттальной плоскости звеньев экзоскелета оценивается абсолютными углами наклона бедра и спины φ_3, φ_4 .

Схема ЛГК комбинированного приведена на рис. 2.

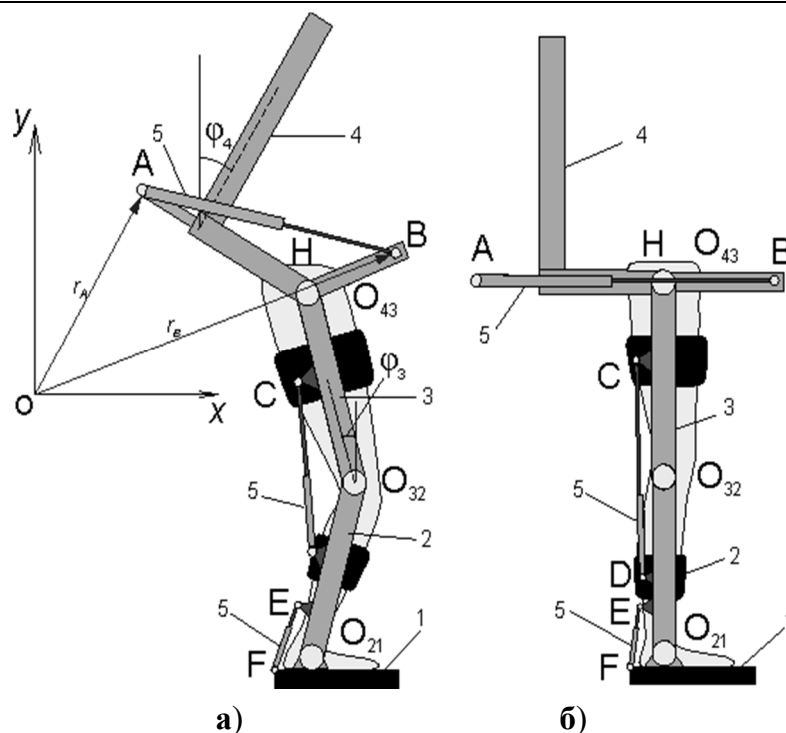


Рис.1. Схема расположения гибридного ЛГК для нижних конечностей человека в экзоскелете:
1 – стопа; 2 – голень; 3 – бедро; 4 – спина; 5 – ГЛГК

Fig. 1. Arrangement diagram of the hybrid LGC for the lower limbs of a person in the exoskeleton
1 – foot; 2 – lower leg; 3 – thigh; 4 – back; 5 – HLGC

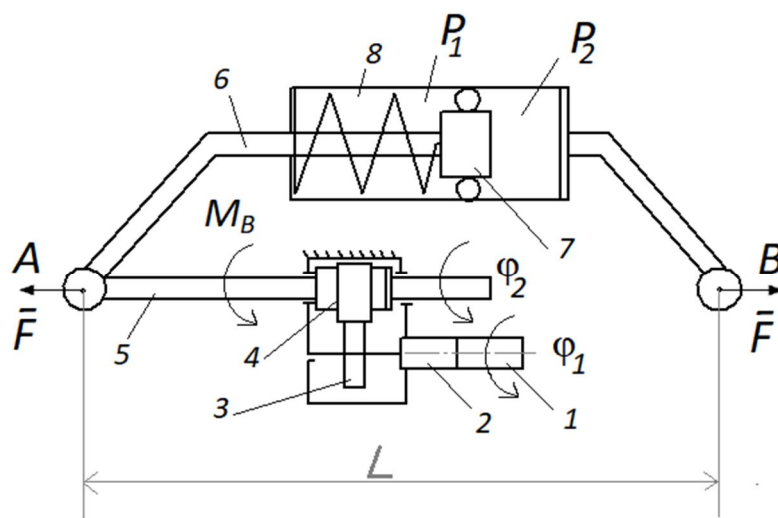


Рис. 2. Схема ГЛГК: P_1 , P_2 – давление в полостях пневматического упругого элемента;
1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – шестерня; 4 – гайка ШВП; 5 – винт;
6 – шток; 7 – поршень; 8 – цилиндр; F – сила, создаваемая ГЛГК

Fig. 2. HLGC diagram: P_1 , P_2 – pressure in air spring chambers; 1 – electric motor;
2 – reducer; 3 – gear; 4 – ball screw nut; 5 – screw; 6 – rod; 7 – piston;
8 – cylinder; F – force created by HLGC

Принцип работы ГЛГК состоит в том, что при сжатии упругого элемента происходит накопление потенциальной энергии, которая потом, при растяжении, отдается экзоскелету в виде момента. Параллельно с этим электропривод, установленный в ГЛГК, создаст ассистирующий управляемый момент, приводящий в движение спину экзоскелета относительно бедра. Эти моменты помогают человеку выполнять необходимые движения. Определим силу, создаваемую ГЛГК, по формуле

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (1)$$

где Φ_1 – сила упругого элемента; Φ_2 – сила электропривода.-

$$\Phi_1 = C\Delta L, \quad (2)$$

где C – коэффициент, определяемый свойствами упругого элемента; ΔL – деформация упругого элемента.

$$\Phi_2 = \frac{2\pi M_B}{h}, \quad (3)$$

где M_B – момент электропривода, приведенный к гайке ШВП, h – шаг винта ШВП.

$$M_B = \frac{h\Phi_2}{2\pi}. \quad (4)$$

Момент, создаваемый электродвигателем, найдем по формуле:

$$M_{\text{эд}} = \frac{M_B}{\eta_p \eta}, \quad (5)$$

где $M_{\text{эд}}$ – момент электродвигателя; η_p – передаточное отношение гайка-шестерня; η – передаточное отношение редуктора.

Ток в обмотках электродвигателя ЛГК найдем по формуле: $i = M_{\text{эд}} / c_M$, где i – ток в обмотках электродвигателя ЛГК; c_M – постоянная момента электродвигателя. Величину управляющего напряжения определим из уравнения полного тока:

$$U = L \frac{di}{dt} + iR + c_E \dot{\varphi}, \quad (6)$$

где L , R , c_E – параметры электродвигателя.

Для разработки и исследования ГЛГК разработаны кинематическая и динамическая модели системы, которая позволяет детально проработать процесс поведения экзоскелетной системы, оснащенной ГЛГК. Для решения задачи об определении связи между соответствующими координатами применим векторно - матричный метод.

Примем следующие обозначения: $\vec{r}_i^{(0)}$ – радиус-вектор, определяющий положение шарниров в глобальной системе координат XOY . Радиус-вектор $r_A^{(0)}$, определяющий положение точки A , найдем по формуле

$$\vec{r}_A^{(0)} = \sum_{i=1}^3 \vec{r}_i^{(o)} + \vec{r}_{4A}^{(o)}. \quad (7)$$

Радиус вектор $r_B^{(0)}$, определяющий положение точки B , найдем по формуле

$$\vec{r}_B^{(0)} = \sum_{i=1}^3 \vec{r}_i^{(o)} + \vec{r}_{3B}^{(o)}. \quad (8)$$

Далее примем, что $O_{43}B$ перпендикулярно $O_{43}O_{32}$. Установим связь между векторами в глобальной $^{(0)}$ и локальных координатных системах $^{(i)}$, связанных с

соответствующими звеньями, применив формулу

$$\bar{r}_i^{(0)} = T_{io} \bar{r}_i^{(i)}. \quad (9)$$

Матрица поворота локальных координатных систем относительно глобальной представим в виде:

$$T_{io} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Запишем очевидное равенство:

$$\bar{r}_B = \bar{r}_A + \bar{r}_{AB}, \quad (11)$$

отсюда можно найти расстояние между точками А и В

$$\bar{r}_{AB} = \bar{r}_B - \bar{r}_A \quad (12)$$

или, с учетом (1) (2), получим:

$$\bar{r}_{AB} = \sum_{i=1}^3 \bar{r}_i^{(o)} + \bar{r}_{4A}^{(o)} - \sum_{i=1}^3 \bar{r}_i^{(o)} - \bar{r}_{3B}^{(o)} = \bar{r}_{4A}^{(o)} - \bar{r}_{3B}^{(o)}, \quad (13)$$

$$\text{где } \bar{r}_{AB} = \begin{vmatrix} x_{AB} \\ y_{AB} \end{vmatrix}; \bar{r}_{3B} = \begin{vmatrix} x_{O_{43}B} \\ y_{O_{43}B} \end{vmatrix}; \bar{r}_{4A} = \begin{vmatrix} x_{O_{43}A} \\ y_{O_{43}A} \end{vmatrix}.$$

Отсюда следует, что перемещение ГЛГК зависит только от положения векторов $\bar{r}_{3B}$ и $\bar{r}_{4A}$. Текущая длина ГЛГК определится по формуле

$$L^2 = x_{AB}^2 + y_{AB}^2. \quad (14)$$

Для моделирования движения БТШС примем, что планируемый закон

изменения угла φ_5^* является гладкой функцией, которая, как и ее первая и вторая производные, не имеет разрывов в начальный и конечный моменты движения. Такая функция может быть представлена в виде комбинации отрезков прямой и двух полиномов седьмого порядка. Будем считать, что общее время выполнения упражнения состоит из четырех отдельных этапов:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (15)$$

где t_1 – время подготовки; t_2 – выполнения наклона; t_3 – фиксации спины в положении наклона и отрыва груза от поверхности; t_4 – подъема спины.

$$\begin{cases} \varphi_4(t) = 0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \varphi_4(t) = \sum_{i=0}^7 c_i \cdot t^i & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \varphi_4(t) = \varphi_{4\max}^* & t_2 \leq t \leq t_3 \\ \varphi_4(t) = \sum_{i=0}^7 d_i \cdot t^i & t_3 \leq t \leq t_4. \end{cases} \quad (16)$$

Динамическая модель движения экзоскелета с ГЛГК можно описать с помощью нелинейного матричного уравнения, имеющего вид

$$\dot{\bar{X}} = A(\bar{X}) + B(\bar{X})\bar{U}, \quad (17)$$

где $\bar{X} = (\varphi_4, \omega_4, \varphi_5, \omega_5)^T$; $\omega_4 = \dot{\varphi}_4$ $\omega_5 = \dot{\varphi}_5$;

$$A(\bar{X}) = \begin{vmatrix} \omega_4 \\ L_4 \sin(\varphi_4) m_4 g + C_{54}(\varphi_4 - \varphi_5) + \mu_{54}(\omega_4 - \omega_5) + (\Phi_1 + \Phi_2) O_{43} H \\ \omega_5 \\ L_5 m_5 g \sin \varphi_5 + (L_8 \sin \varphi_8 + L_5 \sin \varphi_5)(\delta_2(t - t_2) m_8 g - \delta_1(t - t_2) N_{80}) - \\ C_{54}(\varphi_4 - \varphi_5) - \mu_{54}(\omega_4 - \omega_5) + K_p(\varphi_5^* - \varphi_5) \end{vmatrix}; \quad (18)$$

$$B(\bar{X}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & O_{43}H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (19)$$

$$\bar{U} = (0, \Phi_2(U), 0, 0)^T. \quad (20)$$

$$\delta_1(t - t_2) = \begin{cases} 0 & t \leq t_2 \\ 1 & t_3 \geq t \geq t_2 \end{cases};$$

$$\delta_2(t - t_2) = \begin{cases} 0 & t \leq t_2 \\ 1 & t \geq t_2 \end{cases}. \quad (22)$$

Определение внешних возмущающих моментов (момент веса) на всем временном интервале

$$0 \leq t \leq t_4$$

представим в виде:

$$M_5 = L_5 m_5 g \sin \varphi_5 + (L_8 \sin \varphi_8 + L_5 \sin \varphi_5)(\delta_2(t - t_2) m_8 g - \delta_1(t - t_2) N_{80}). \quad (21)$$

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента, полученного путем интегрирования системы уравнений (17). Изменение желаемого угла наклона спины оператора $\varphi_4(t)$ (16), нормальной реакции груза $N_{80}(t)$, момента силы веса $M_5(t)$ (21) представлены на рис.3.

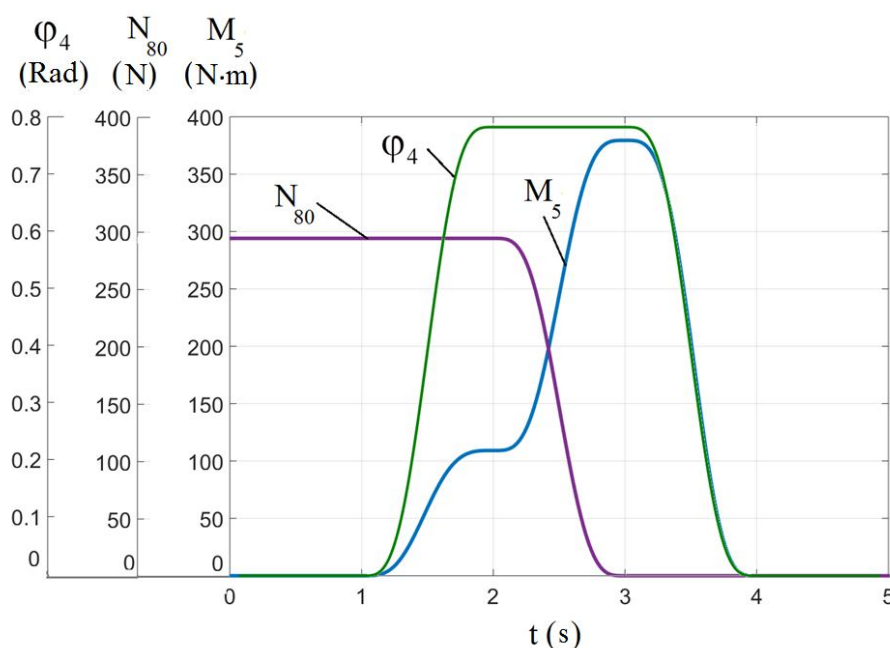


Рис. 3. Изменение желаемого угла наклона спины оператора $\varphi_4(t)$, нормальной реакции груза $N_{80}(t)$, момента силы веса $M_5(t)$

Fig. 3. Change in the desired angle of inclination of the operator's back $\varphi_4(t)$, normal reaction of the load $N_{80}(t)$, of the gravity moment $M_5(t)$

Зависимости построены для следующих интервалов времени $t_1 = 1$; $t_2 = 2$; $t_3 = 3$; $t_4 = 4$.

Графики показывают, что в правой части дифференциальных уравнений движения (18) имеет место геометриче-

ская и физическая нелинейности, а также немонотонное изменение возмущающих воздействий в зависимости от времени.

Далее на рис.4 приведены графики изменения углов наклона оператора и экзоскелета.

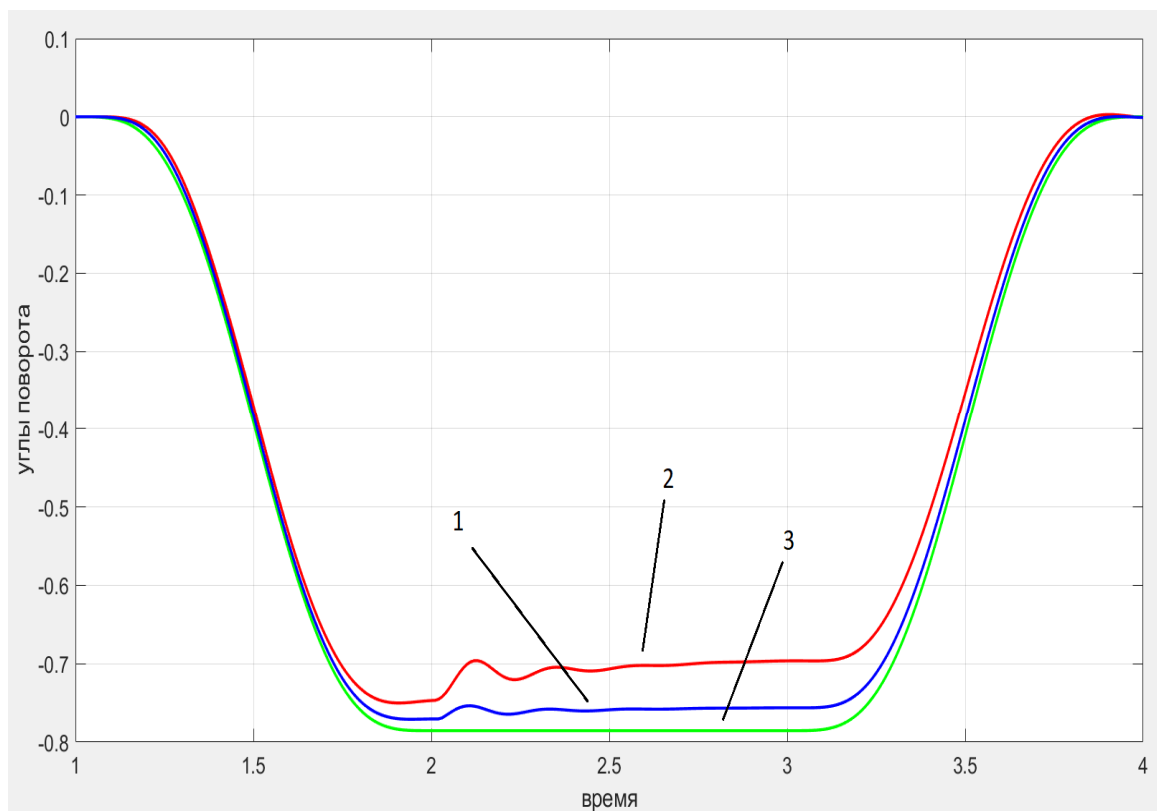


Рис. 4. Графики изменения углов наклона оператора и экзоскелета: **1** – зависимость угла поворота спины экзоскелета $\varphi_4(t)$; **2** – зависимость реального угла поворота спины оператора $\varphi_5(t)$; **3** – зависимость реального угла поворота спины оператора $\varphi_5^*(t)$.
 $K_u = 30$; $K_{du} = 0,1$; $K_p = 0$; $K_d = 0$; $C_{54} = 3000$; $M_{54} = 100$; $C = 7000 \text{ Н/м}$

Fig. 4. Graphs of changes in the turning angles of the operator and the exoskeleton:
1 – dependence of the turning angle of the back of the exoskeleton; **2** – dependence of the actual turning angle of the operator's back; **3** – dependence of the actual turning angle of the operator's back $\varphi_5^*(t)$. $K_u = 30$; $K_{du} = 0,1$; $K_p = 0$; $K_d = 0$; $C_{54} = 3000$; $M_{54} = 100$;
 $C = 7000 \text{ N/m}$

На рис. 5 показаны графики изменения момента, создаваемого ГЛГК. График 1 соответствует моменту, создаваемому упругим элементом. График 2 – моменту, создаваемому электроприводом. На рис. 6 показано изме-

нение тока в электроприводе ГЛГК, графики изменения момента, создаваемого ГЛГК. График 1 соответствует моменту, создаваемому упругим элементом. График 2 – моменту, создаваемому электроприводом.

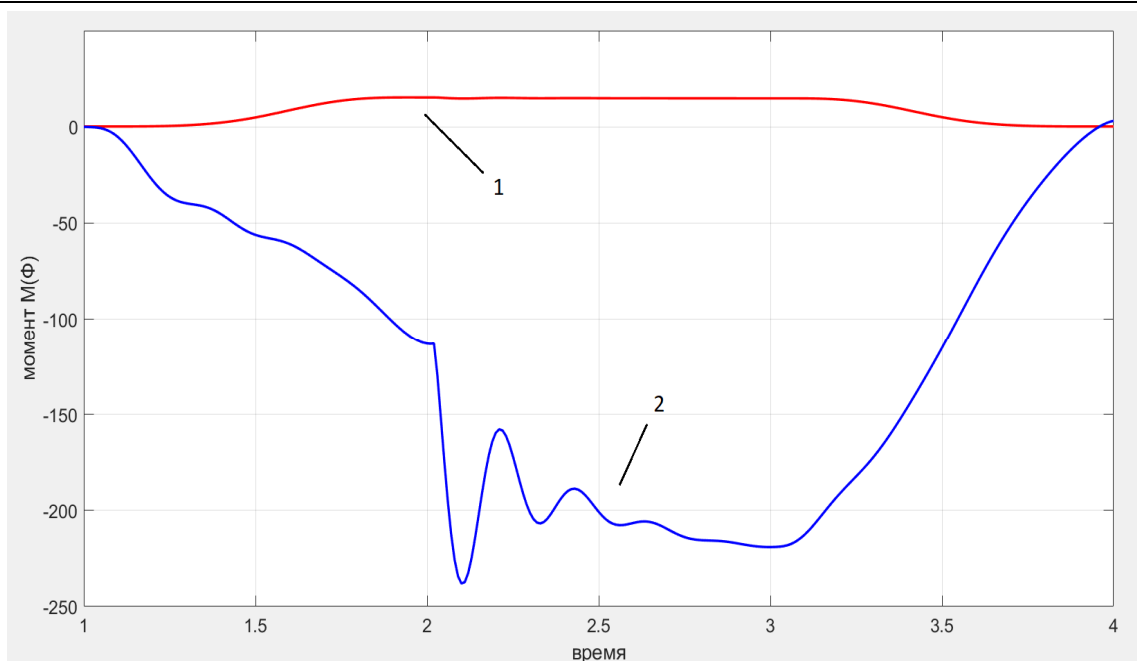


Рис. 5. Графики изменения момента, создаваемого ГЛГК: **1** – момент упругого элемента;
2 – момент электропривода

Fig. 5. Graphs of changes of the moment created by GLGK: **1** – elastic element moment;
2 – electric drive moment

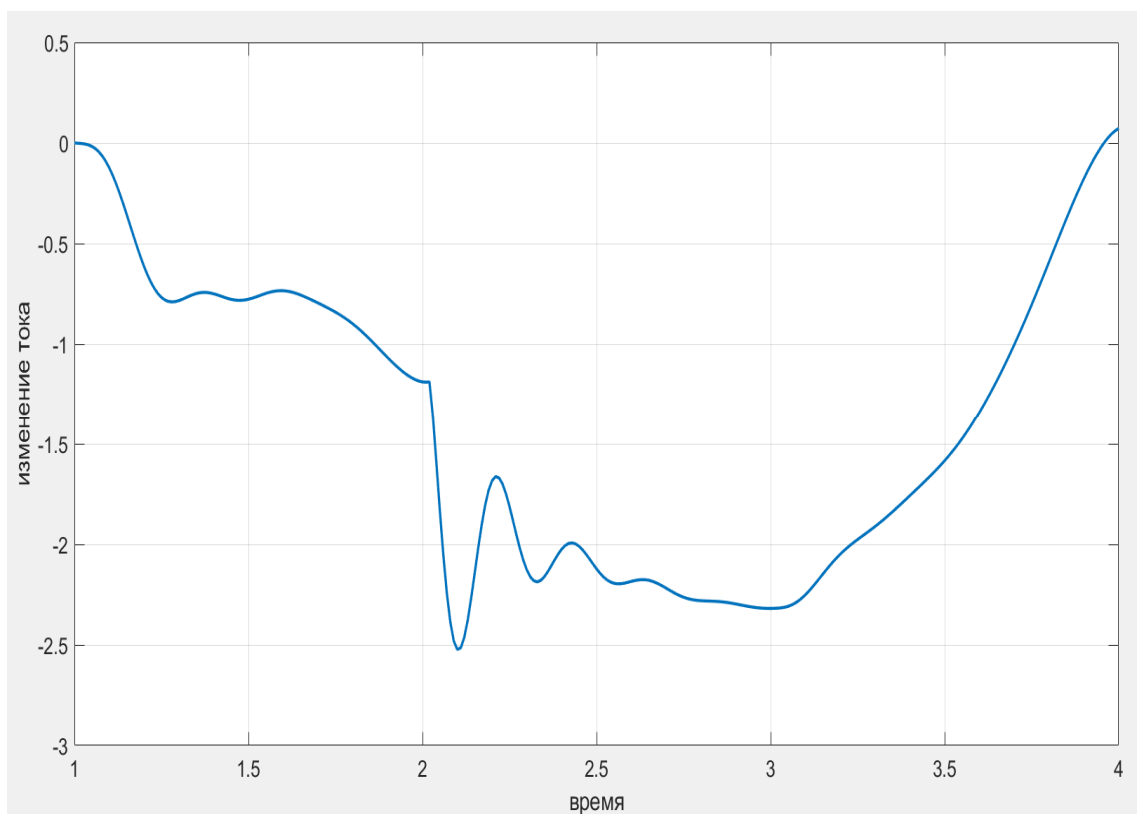


Рис. 6. Изменение тока в электроприводе ГЛГК

Fig. 6. Current change in the GLGK electric drive

Выводы

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана кинематическая модель движения экзоскелета с ГЛГК. Определены зависимости деформации ГЛГК от величины геометрических размеров и углов поворота спины φ_4 и бедра φ_3 , определяющих положение шарниров ЛГК.

2. Получены динамические модели движения в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка, связывающие между собой моменты, действующие на оператора и экзоскелет, угловые ускорения спины оператора и

экзоскелета, приобретаемые в результате действия этих моментов.

3. Для моделирования подъема груза применен принцип декомпозиции, позволяющий разделить процесс на четыре этапа, что позволяет рассматривать каждый этап независимо от других этапов, для связи между которыми предлагается использовать граничные условия. Для каждой фазы движения экзоскелета сформулированы и решены задачи кинематики и динамики функционирования системы. Построены зависимости изменения углов наклона оператора и экзоскелета, а также изменения момента, создаваемого ГЛГК и изменения тока в электроприводе.

Список литературы

1. Корневский Н.А., Яцун С.Ф., Яцун А.С. Экзоскелет с биотехнической обратной связью для вертикализации пациентов // Медицинская техника. 2017. № 3. С. 48-51.
2. Экзоскелеты: анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, О.В. Емельянова, А.С. Яцун, Р.Н. Турлапов. Курск, 2015. 179 с.
3. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation / S.F. Jatsun, Al Maji Kh.Kh.M., V.E. Pavlovsky, A.S. Yatsun, A.E. Karlov, E.V. Saveleva // В сборнике по итогам конференции: Developments in eSystems Engineering 2019. Robotics, Sensors and Industry 4.0. Казань, 2019.
4. Plagenhoef Stanley, F. Gaynor Evans, Thomas Abdelnour. "Anatomical data for analyzing human motion" // Research quarterly for exercise and sport. 1983. 54, № 2. P. 169-178.
5. Spada S. et al. Analysis of exoskeleton introduction in industrial reality: main issues and EAWS risk assessment // International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, Cham, 2017. С. 236-244.
6. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks / J. Theurel, K. Desbrosses, T. Roux, A. Savescu // Applied ergonomics. 2018. № 67. P. 211-217.

7. Ulrey B. L., Fathallah F. A. Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2013. Vol. 23. №. 1. P. 206-215.
8. Strausser K. A., Kazerooni H. The development and testing of a human machine interface for a mobile medical exoskeleton // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2011. P. 4911-4916.
9. Talaty M., Esquenazi A., Briceno J. E. Differentiating ability in users of the ReWalk TM powered exoskeleton: An analysis of walking kinematics // 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). IEEE, 2013. P. 1-5.
10. Esquenazi A. et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury // *American journal of physical medicine & rehabilitation*. 2012. Vol. 91. №. 11. P. 911-921.
11. Neuhaus P. D. et al. Design and evaluation of Mina: A robotic orthosis for paraplegics // 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. IEEE, 2011. P. 1-8.
12. Yan T. et al. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons // *Robotics and Autonomous Systems*. 2015. Vol. 64. P. 120-136.
13. Sankai Y. HAL: Hybrid assistive limb based on cybernics // *Robotics research*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 25-34.
14. Farris R. J., Quintero H. A., Goldfarb M. Preliminary evaluation of a powered lower limb orthosis to aid walking in paraplegic individuals // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2011. Vol. 19. №. 6. P. 652-659.
15. Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А.Е. Моделирование подъема груза с помощью промышленного экзоскелета // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018; 22(6): 14-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-6-14-20>.
16. Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией / С.Ф. Яцун, В.М. Антипов, А. Е. Карлов, Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019; 23(2): 8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>.

References

1. Korenevskiy N. A. et al. Ekzoskelet s biotekhnicheskoi obratnoi svyaz'yu dlya vertikalizatsii patsientov [An exoskeleton with biotechnical feedback for verticalization of patients]. *Meditinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 285-289 (In Russ.).
2. Yatsun S.F., Savin S.I., Emelyanova O. V., Yatsun A.S., Turlapov R.N. *Ekzoskelety: analiz konstruktsii, printsipy sozdaniya, osnovy modelirovaniya* [Exoskeletons: analysis of structures, principles of creation, foundations of modeling]. Kursk, 2015. 179 p. (In Russ.).

3. Jatsun S.F., Al Maji Kh.Kh.M., V Pavlovsky.E., Yatsun A.S., Karlov A.E., Saveleva E.V. Analysis of the effect of the exoskeleton geometrical dimensions on the nature of a linear compensator operation. *Developments in eSystems Engineering 2019, Robotics, Sensors and Industry 4.0*. Kazan, 2019.
4. Plagenhoef Stanley, Gaynor Evans F., Thomas Abdelnour. Anatomical data for analyzing human motion. *Research quarterly for exercise and sport*, 1983, 54, no. 2, pp. 169-178.
5. Spada S. et al. Analysis of exoskeleton introduction in industrial reality: main issues and EAWS risk assessment. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Springer, Cham, 2017, pp. 236-244.
6. Theurel J., Desbrosses K., Roux T., Savescu A. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied ergonomics*, 2018, no. 67, pp.211-217.
7. Ulrey B. L., Fathallah F. A. Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 206-215.
8. Strausser K. A., Kazerooni H. The development and testing of a human machine interface for a mobile medical exoskeleton. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2011, pp. 4911-4916.
9. Talaty M., Esquenazi A., Briceno J. E. Differentiating ability in users of the ReWalk TM powered exoskeleton: An analysis of walking kinematics. 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), IEEE, 2013, pp. 1-5.
10. Esquenazi A. et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2012, vol. 91, no. 11, pp. 911-921.
11. Neuhaus P. D. et al. Design and evaluation of Mina: A robotic orthosis for paraplegic. 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotic, IEEE, 2011, pp. 1-8.
12. Yan T. et al. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, vol. 64, pp. 120-136.
13. Sankai Y. HAL: Hybrid assistive limb based on cybernics. Robotics research. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 25-34.
14. Farris R. J., Quintero H. A., Goldfarb M. Preliminary evaluation of a powered lower limb orthosis to aid walking in paraplegic individuals. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 652-659.
15. Yatsun S.F., Antipov V.M., Karlov A.E. Modelirovanie pod"ema gruzs pomoshch'yu promyshlennogo ekzoskeleta [Modeling of Loading by Industrial Exoskeleton]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018; 22(6): 14-20 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-6-14-20.

16. Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. Ye., Al Manji Hamil Hamed Mohammed. Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(2): 8-17 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17.

Информация об авторах / Information about the Authors

Карлов Андрей Евгеньевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrei E. Karlov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Постольный Алексей Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: a.postolny@mail.ru

Alexei A. Postolny, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: a.postolny@mail.ru

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

Andrei V. Fedorov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

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

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Определение границы сжимаемой толщи при проведении инженерных изысканий

К.О. Дубракова¹ ✉, В.А. Солодилова¹

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

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Ошибки и неточности при составлении отчетных материалов, по результатам инженерных изысканий, являющихся неотъемлемой и важной частью проектно-сметной документации, могут привести к необратимым последствиям и значительно сократить срок эксплуатации зданий и сооружений. Основной сложностью при исследовании физико-механических свойств грунта строительной площадки является определение глубины выработки. Это связано с тем, что увеличение расчетной глубины приводит к повышению стоимости работ, а ее снижение – к риску возникновения неточностей и ошибок при проектировании фундаментов зданий и сооружений. В соответствии с действующими нормативными документами выработка при проведении инженерно-геологических изысканий должна быть на 1-2 метра ниже границы сжимаемой толщи. Приведено условие, на основании которого определяется указанная граница. Разработка методики, позволяющей определять глубину сжимаемой толщи на этапе проведения инженерных изысканий с достаточной точностью, представляет практически важную задачу.

Методы. Определив природное напряжение $\sigma_{zg,0}$ как произведение глубины заложения фундамента d на удельный вес грунта, залегающего выше подошвы γ'_{II} , учитывая, что среднее давление стремится к значению расчетного сопротивления грунта, показано, что основное влияние на параметры сжимаемой толщи, а соответственно и на значение глубины выработки, оказывает физико-механическое строение грунта основания. При этом напряжения, передаваемые фундаментом здания или сооружения, оказывают косвенное воздействие.

Результаты. Определены максимальные значения глубины выработки при производстве инженерно-геологических изысканий для песка плотного крупного, средней плотности и крупности и мелкого и супеси.

Заключение. Сделан вывод о том, что приведенная методика позволяет определять глубину выработки при проведении инженерно-геологических изысканий с достаточной точностью.

Ключевые слова: инженерные изыскания; сжимаемая толщина; глубина выработки; инженерно-геологическое строение.

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

Для цитирования: Дубракова К.О., Солодиловa В.А. Определение границы сжимаемой толщи при проведении инженерных изысканий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 79-87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-79-87>.

Поступила в редакцию 17.03.2020

Подписана в печать 04.05.2020

Опубликована 30.06.2020

Determination of the Boundaries of the Compressible Strata When Conducting Engineering Surveys

Kseniya O. Dubrakova ¹ ✉, Victoria A. Solodilova ¹

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

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Errors and inaccuracies in the preparation of deliverables based on the results of engineering surveys which are an integral and important part of the design and estimate documentation, can lead to irreversible consequences and significantly reduce the life of buildings and structures. The main difficulty in investigating soil physical and mechanical properties at a construction site is to determine the depth of excavation. This is due to the fact that an increase in the calculated depth leads to the increase in the cost of work, and its decrease leads to the risk of inaccuracies and errors in the design of foundations of buildings and structures. In accordance with the current regulatory documents, the excavation depth during soil investigation should be 1-2 meters below the boundary of the compressible strata. The condition on the basis of which the specified boundary is determined is provided. The development of a technique that allows determining the depth of the compressible strata at the stage of engineering surveying with adequate accuracy is an important task from a practical standpoint.

Methods. Determining natural stress $\sigma_{zg,0}$ as the product of foundation depth d and the specific gravity of the soil above the base γ'_{II} , taking into account the fact that the average pressure tends to the value of the estimated resistance of the soil, it is shown that physical-mechanical structure of the base soil exerts the main influence on the parameters of the compressible strata, and correspondingly, to the excavation depth value. In this case, the stresses transferred by the foundation of a building or structure have an indirect effect.

Results. The maximum values of the depth of excavation for engineering and geological surveying for tight coarse sand, medium density and fineness sand, and fine sand and sandy loam are determined.

Conclusion. It is concluded that the given technique allows determining the depth of excavation during engineering and geological surveying with an adequate accuracy.

Keywords: engineering surveying; compressible strata; excavation depth; engineering and geological structure.

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

For citation: Dubrakova K. O., Solodilova V. A. Determination of the Boundaries of the Compressible Strata When Conducting Engineering Surveys // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 79-87 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-79-87>.

Received 17.03.2020

Accepted 04.05.2020

Published 30.06.2020

Введение

Материалы, содержащие результаты инженерных изысканий, являются неотъемлемой и важной частью проектно-сметной документации. Ошибки и неточности, допущенные при лабораторном исследовании, могут привести к необратимым последствиям, значительно сократив срок эксплуатации зданий и сооружений¹ [1-19]. Инженерные изыскания подразумевают собой исследование физико-механических свойств грунта строительной площадки. В ходе анализа полученных данных перед инженерами появляется сложный вопрос об определении глубины выработки. Это связано с тем, что увеличение указанной глубины приводит к повышению стоимости работ, а ее снижение – к риску возникновения неточностей и ошибок при проектировании фундаментов зданий и сооружений.

В соответствии с действующими нормативными документами глубина выработки при проведении инженерно-геологических изысканий должна быть на 1-2 метра ниже границы сжимаемой толщи. С учетом требований СП 22.13330.2016 определить указанную глубину можно из равенства вертикального напряжения и половины природного:

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

$$\alpha \cdot p = 0,5 \cdot (\sigma_{zg,0} + z \cdot \gamma_{II}), \quad (1)$$

где p – среднее давление под подошвой фундамента; $\sigma_{zg,0}$ – природное напряжение на уровне дна котлована; γ_{II} – осредненное значение удельного веса грунта, залегающего ниже подошвы фундамента.

Основная сложность при определении границы сжимаемой толщи состоит в том, что в большинстве случаев данные о физико-механических характеристиках грунтов строительной площадки известны приблизительно или не известны совсем. При этом расчет глубины выработки сводится к определению осредненных данных, представленных в таблицах действующих нормативных документов.

Следовательно, разработка методики, позволяющей определять глубину сжимаемой толщи на этапе проведения инженерных изысканий с достаточной точностью, представляет практически важную задачу.

Материалы и методы

Определив природное напряжение $\sigma_{zg,0}$ как произведение глубины заложения фундамента d на удельный вес грунта, залегающего выше подошвы γ'_{II} , считая на этапе предварительного расчета $\gamma'_{II} = \gamma_{II}$, представим выражение (1) в виде

$$\frac{\alpha \cdot p}{\gamma_{II}} = 0,5 \cdot (d + z). \quad (2)$$

Учитывая, что для фундамента, запроектированного с минимальным требуемым запасом несущей способности

по второй группе предельных состояний, среднее давление под подошвой стремится к значению расчетного сопротивления грунта основания, выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\alpha \cdot R}{\gamma_{II}} = 0,5 \cdot (d+z). \quad (3)$$

При определении глубины выработки на этапе проведения инженерно-геологических изысканий глубина фундамента d определяется из конструктивных особенностей зданий и соору-

жений и сезонного промерзания грунта. Отношение расчетного сопротивления грунта к удельному весу – специфический показатель для каждого строительного участка.

Результаты и их обсуждение

В связи с тем, что коэффициент α имеет сложную математическую зависимость от глубины z , отсчитываемой от уровня подошвы фундамента, уравнение (3) удобно решать графически (рис. 1).

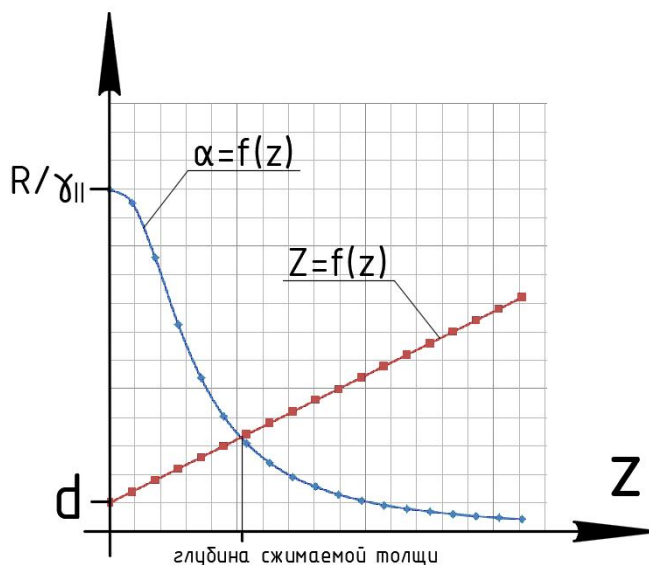


Рис. 1. К определению глубины сжимаемой толщи

Fig. 1. To the determination of the depth of the compressible strata

Из равенства (3) видно, что максимальное значение глубины выработки, необходимой при выполнении инженерно-геологических изысканий, прямо пропорционально отношению расчетного сопротивления грунта к удельному весу. При этом указанная глубина не зависит от передаваемой на основание нагрузки.

$$\frac{R}{\gamma_{II}} = \frac{0,5 \cdot (d+z)}{\alpha}. \quad (4)$$

Для решения уравнения (4) построим график зависимости отношения расчетного сопротивления грунта к удельному весу от глубины z : $\frac{R}{\gamma_{II}} = f(z)$ (рис. 2).

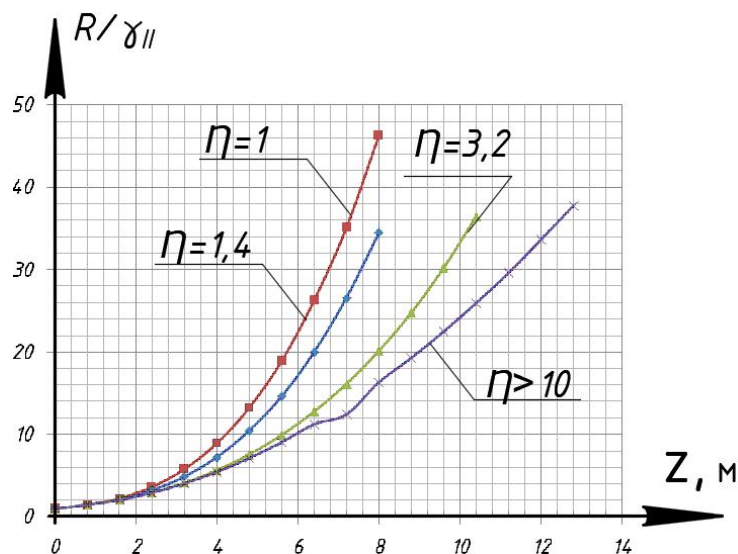


Рис. 2. Зависимость отношения расчетного сопротивления грунта к удельному весу от глубины

Fig. 2. Dependence of the ratio of the calculated soil resistance to the specific gravity on the depth

С учетом действующих нормативных документов отношение $\frac{R}{\gamma_{II}}$ для песка плотного крупного составляет 37, для песка средней плотности и крупности – 25; для мелкого – 17,65; для супеси – 8,82.

Следовательно, максимальное значение глубины выработки при производстве инженерно-геологических изысканий составляет: для песка плотного крупного (14,5 м+d), для песка средней плотности и крупности – (14,1 м+d); для мелкого – (10,2 м+d); для супеси – (7,65 м+d).

Выводы

Приведённая методика позволяет определять глубину выработки при проведении инженерно-геологических изысканий с достаточной точностью. Основное влияние на параметры сжимаемой толщи, а соответственно и на значение указанной глубины, оказывает физико-механическое строение грунта основания. Напряжения, передаваемые фундаментом здания или сооружения, оказывают косвенное воздействие.

Список литературы

1. Nguyen M.D. [et al.]. Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression // Geosynthetics. 2013. № 20 (3). P. 207 – 225.
2. Phoon K.-K., Retief J.V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. Matieland, South Africa, 2016. P. 249.

3. Барановский А.Г. Изменение физико-механических свойств элювиальных глинистых грунтов под влиянием техногенных факторов // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: матер. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. М., 2015 г. С.92-97.
4. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2014. 696 с.
5. Деминцева Е.А., Вайнштейн В.М. Анализ изменения физико-механических свойств грунтов при стабилизации их модификатором «Пенетрон» // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т.3. С.157-162.
6. Калугин П.И., Пятигор Д.А. Особенности работы грунтов оснований фундаментов после реконструкции зданий // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. №1. С.60-64.
7. Расчётный анализ длительного деформирования системы «здание-основание здания» хранилища ядерных отходов АЭС / В.И. Колчунов, В.В. Потапов, К.О. Дмитриева, В.А. Ильин // Строительство и реконструкция. 2017. №4(72). С.27-33.
8. Оценка влияния возводимого многоэтажного здания на техническое состояние близлежащих строений / А.А. Краснов, А.Л. Четвериков, С.Г. Шейна, В.Г. Шумеев // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии города: сборник материалов III Всероссийской научной конференции. Пенза: Приволжский дом знаний, 2001. С. 3-5.
9. Сопоставление результатов экспериментальных исследований механических свойств аргиллитов при выборе параметров, используемых в проектировании зданий и сооружений / М.А. Акбуляков, А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина, А.Ю. Черепанов // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2013. №1.
10. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Исследования механических свойств глинистых грунтов в условиях пространственного напряжённого состояния // Известия КГАСУ. 2010. №1(13). С.170-175.
11. Никифоров В.В., Селиверстов М.М., Березнев В.А. Инженерные решения реконструкции фундамента в условиях аномалий физико-механических свойств грунта // Молодёжная наука: технологии, инновации: матер. конф. Пермь, 2014. С.282-286.
12. Полищук А.И. Подход к оценке загрузки оснований фундаментов реконструируемых и восстанавливаемых зданий // Вестник ТГАСУ. 2000. №1. С.313-326.
13. Пономарёв А.Б. К вопросу об изменении физико-механических характеристик грунтов в процессе строительства и эксплуатации зданий // Строительство и транспорт. 2013. №2(14). С.104-109.
14. Простов С.М., Смирнов Н.А., Бахаева С.П. Прогноз физико-механических свойств намывного массива по данным электрических зондирований // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. №1. С.69-78.

15. Изменение расчётного сопротивления грунтов основания, работающего как нелинейная неупругая система / А.А. Сморгачев, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №2. С.54-56.
16. Расчёт деформаций основания с использованием нелинейной неупругой системы / А.А. Сморгачев, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №2. Ч.3. С.182-185.
17. Изменение расчетного сопротивления грунтов основания, работающего как нелинейная неупругая система / А.А. Сморгачев, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №2. С.54-56.
18. Торов В.В., Цимбельман Н.Я. Изменение физико-механических свойств грунтов при сейсмическом воздействии // Вологодские чтения. 2014. №70. С.7-8.
19. Оценка взаимного влияния зданий и подземных сооружений / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, В.А. Васенин // Георекострукция. 2012. №231.

References

1. Nguyen M.D. [et al.]. Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression. *Geosynthetics*, 2013, no. 20 (3), pp. 207–225.
2. Phoon K.-K., Retief J.V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. Matieland, South Africa, 2016, 249 p.
3. Baranovsky A.G. [Changes in the physico-mechanical properties of eluvial clay soils under the influence of technogenic factors]. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami v sovremennom mire*. Sbornik [Collection. Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world]. Moscow, 2015, pp. 92-97 (In Russ.).
4. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie vo-prosa* [Methods for determining the mechanical properties of soils.State of the issue monograph]. Penza, PGUAS Publ., 2014. 696 p. (In Russ.).
5. Demintseva EA, Weinstein V.M. Analiz izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov pri stabilizatsii ikh modifikatorom «Penetron» [Analysis of changes in the physical and mechanical properties of soils during stabilization by the Penetron modifier]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse = Modernization and Scientific Research in the Transport Complex*, 2013, vol. 3, pp. 157-162 (In Russ.).
6. Kalugin P.I., Pyatigor D.A. Osobennosti raboty gruntov osnovanii fundamen-tov posle rekonstruktsii zdaniy [Features of the work of soils of foundations after reconstruction of buildings]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*, 2017, no. 1, pp.60-64 (In Russ.).

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

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

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

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

11. Nikiforov V.V., Seliverstov M.M., Bereznev V.A. [Engineering solutions for the reconstruction of the foundation in the conditions of anomalies in the physical and mechanical properties of the soil]. *Molodezhnaya nauka: tekhnologii, innovatsii* [Youth Science: Technologies, Innovations]. Perm, 2014, pp. 282-286 (In Russ.).

12. Polishchuk A.I. Podkhod k otsenke zagruzheniya osnovanii fundamentov rekonstruiemykh i vosstanavliyaemykh zdaniy [An approach to assessing the load on the foundations of the foundations of reconstructed and restored buildings]. *Vestnik TGASU = Bulletin of TGASU*, 2000, no. 1, pp.313-326 (In Russ.).

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

14. Prostov S.M., Smirnov N.A., Bakhaeva S.P. Prognoz fiziko-mekhanicheskikh svoystv namynogo massiva po dannym elektricheskikh zondirovaniy [Forecast of the physico-mechanical properties of the alluvial massif according to electrical sounding data]. *Fiziko-*

tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Physicotechnical Problems of Mining, 2015, no.1, pp.69-78 (In Russ.).

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

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

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

18. Torov V.V., Tsymbelman N.Ya. Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov pri seismicheskom vozdeystviye [Change of physical and mechanical properties of soils under seismic impact]. *Vologdinskie chteniya = Vologda Readings*, 2014, no. 70, pp. 7-8 (In Russ.).

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

Информация об авторах / Information about the Authors

Дубракова Ксения Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Kseniya O. Dubrakova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

Солодилова Виктория Андреевна, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Victoria A. Solodilova, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-88-98>

Исследование влияния срока хранения древесины сосны на выносливость при сжатии вдоль волокон

А. В. Масалов¹ ✉, В. А. Солодилова¹

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

✉ e-mail: masalow.al@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование влияния срока хранения древесины сосны на выносливость при сжатии вдоль волокон, а также обоснование полученных результатов. Древесина анизотропна, в зависимости от направления волокон механические и физические свойства материала сильно отличаются.

Методы. Древесина анизотропна, изменение её выносливости зависит не только от условий, срока хранения, влажности, но и от направления волокон в бруске. Однако актуальность использования этого материала до сих пор остается неизменной. Испытания проводились на прессе типа УМ-5. После проведения исследования на сжатие проводили испытания на определение влажности и результаты испытаний образцов приводили к результатам при влажности 12%. Неиспытанные образцы хранились с 1981 г. по 2019 г. в условиях лаборатории кафедры промышленного и гражданского строительства Юго-Западного университета. В 2019 г. хранившиеся образцы были подготовлены к испытаниям и испытаны.

Результаты. Для получения обоснованных данных о влиянии срока хранения древесины на выносливость был проведен эксперимент с брусками, подвергшимися 39-летнему ожиданию в лаборатории кафедры ПГС. Из числа образцов выбрали 16 образцов, которые испытывали на кратковременную нагрузку при сжатии вдоль волокон. Для этих образцов на прессе УМ-5 были записаны диаграммы: «Нагрузка-перемещение». Эксперимент показал два вида разрушения образца, по которым был сделан соответствующий вывод.

Заключение. Прочностные характеристики, выявленные вследствие экспериментов из ядровой и заболонной древесины сосны на образцах 20х20х30 в 1981 г. и в 2020 г., существенно отличались от нормального, на это оказала влияние сравнительно небольшая выборка.

Ключевые слова: древесина; сжатие; волокна; строительный материал; влажность.

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

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 07.04.2020

Подписана в печать 18.05.2020

Опубликована 30.06.2020

© Масалов А. В., Солодилова В. А., 2020

Study of the Influence of Pine Wood Shelf Life on Endurance under Compression along the Grains

Alexander V. Masalov ¹, ✉, Victoria A. Solodilova ¹

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

✉ e-mail: masalov.al@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Study of the influence of pine wood shelf life on endurance under compression along the grains, as well as grounds for results obtained. Wood is anisotropic, depending on the grains, the mechanical and physical properties of the material differ greatly.

Methods Wood is anisotropic, the change in its endurance depends not only on conditions, shelf life, moisture, but also on the direction of the grains in the timber. However, the relevance of using this material still remains unchanged. The tests were carried out on a press of the UM-5 type. After carrying out the compression test, moisture tests were performed and the test results of the specimens were reported at 12% moisture. Untested samples were stored from 1981 to 2019 in the laboratory of the Department of Industrial and Civil Engineering at South-West University. In 2019, the stored samples were prepared for testing and tested.

Results. To obtain substantiated data on the influence of wood shelf life on endurance, an experiment was carried out with the bars that had undergone a 39-year wait in the laboratory of the Department of Industrial and Civil Engineering. From among the samples, 16 samples were selected, which were tested for short-term compression load along the grains. For these samples diagrams "Load-displacement" were recorded on the press UM-5. The experiment showed two types of sample destruction which led to the corresponding conclusion.

Conclusion. The strength characteristics revealed as a result of experiments from core and sapwood of pine on samples 20x20x30 in 1981 and in 2020 significantly differed from normal ones, this was influenced by a relatively small number of samples.

Keywords: wood, compression; grains; building material; moisture.

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

For citation: Masalov A. V., Solodilova V. A. 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 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-88-98>.

Received 07.04.2020

Accepted 18.05.2020

Published 30.06.2020

Введение

Древесина – древнейший строительный материал, который использовал человек в своей хозяйственной, строительной деятельности. Актуальность исполь-

зования этого материала до сих пор остается неизменной. Его экологические, прочностные, физико-химические характеристики весьма высоки.

Древесина анизотропна, в зависимости от направления волокон механические и физические свойства материала сильно отличаются. В этой работе приведены результаты исследований древесины сосны после длительного хранения на сжатие вдоль волокон

Материалы и методы

Двумя основополагающими компонентами в прочности древесины являются лигнин и целлюлоза. Лигнин, являясь связующим веществом, подобно бетону в железобетонных конструкциях, обеспечивает прочность на сжатие древесины. В то же время целлюлоза

выполняет роль «арматуры», выдерживает нагрузку на растяжение. Такой тандем позволяет использовать древесину в качестве материала для несущих конструкций. Однако свойства лигнина и целлюлозы с течением времени могут меняться по причине процессов окисления. Этот факт должен быть учтён при оценке эксплуатационного ресурса конструкций.

Для проведения исследования выносливости сосны при сжатии вдоль волокон использовались образцы стандартных размеров 20x20x30 мм, отобранные согласно схеме, приведенной на рис.1.

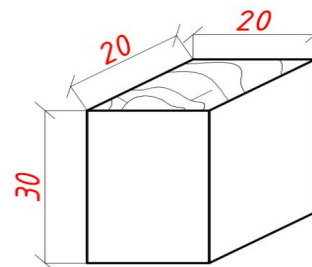
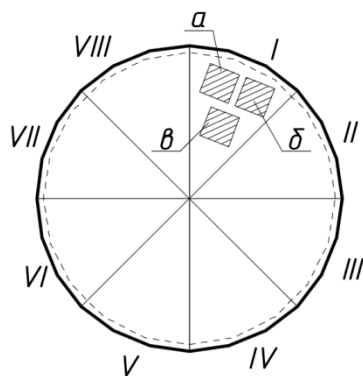


Рис. 1. Схема отбора образцов из соснового бревна. Стандартный образец

Fig. 1. Scheme of sampling from a pine log. Standard sample

К образцам применялась двухстадийная сушка для достижения равновесной 10% влажности. Маркировка образца проводилась по следующей схеме: 3б15, где 3 - номер сектора, б - номер рейки, 15 - номер образца по длине рейки (рис.1).

Для выяснения изменчивости прочности деревянных образцов и установления закона распределения совокупности измерений были проведены испытания кратковременной нагрузкой 64 образцов

на сжатие вдоль волокон. Испытания первых серий образцов в соответствии с ГОСТ 16483.20-73 были выполнены в лаборатории кафедры строительной механики и сопротивления материалов Курского политехнического института (в настоящее время Юго-Западный государственный университет) в 1981г. Испытания проводились на прессе типа УМ-5. Данные о прочностных свойствах образцов древесины заносили в табл. 1.

После проведения испытаний на сжатие проводили испытания на определение влажности и результаты испытаний образцов приводили к результатам при влажности 12%.

Неиспытанные образцы хранились с 1981 г. по 2019 г. в условиях лаборатории.

В 2019 г. хранившиеся образцы были подготовлены к испытаниям и испытаны.

Измерение влажности древесины производилось ускоренным сушильно-весовым методом с помощью низкотемпературной лабораторной электропечи SNOL 67/350.

Перед испытаниями каждый образец взвешивался на лабораторных весах ВЛТЭ-1100.

Сушка образцов производилась по методике ГОСТ 16483.7-71 в электропечи с принудительной циркуляцией воздуха.

Измерения прочности на сжатие вдоль волокон деревянных образцов в 2019 г. проводились в лаборатории промышленного и гражданского строительства с помощью прессы гидравлического ПГМ-100МГ4А.

Для исследования статистической изменчивости прочности и установления закона распределения совокупности измерений отбирали образцы различных серий (1а, 3а, 5б).

Образец подвергался нагружению с постоянной скоростью. Скорость нагружения была такова, что образец разрушался через $(1,0 \pm 0,5)$ мин после начала испытания.

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены результаты исследования образцов из заболонной части ствола древесины, выполненные в 2019 г.

Таблица 1. Результаты испытаний на прочность при сжатии вдоль волокон, кгс, (по данным исходного журнала испытаний 1981г) (начало)

Table 1. Results of testing the strength in compression along grains, kgf, (according to the original test log 1981) (beginning)

№	I		II		III		IV	
	а	б	а	б	а	Б	а	б
0		2315		1830		1860		2285
10	1910	2310	1870	1790	1920	1800	2190	2235
20	1800	1155	1760	1670	1865	1765	1900	2050
30		2050		1780		1880		1980
40	1485	2150	1790	1775	1985	1990	1910	1980
№	V		VI		VI		VIII	
	а	б	а	б	а	Б	а	б
0		2030		2020		2430		2180
10	1840	1840	1950	1885	2175	2510	2230	2200
20	1770	1800	1730	1775	1990	2090	2130	2265
30		1890		1580		2140		2000
40	1915	2135	1905	1860	2210	2490	2040	2235

В табл. 3 – результаты образцов из ядровой части ствола древесины на сжатие вдоль волокон, выполненные в 2019 г.

Из числа образцов выбрали 16 образцов, которые испытывали на кратковременную нагрузку при сжатии вдоль волокон. Для этих образцов на прессе УМ-5 были записаны диаграммы: «Нагрузка-перемещение» (рис.2).

При сжатии вдоль волокон призматических образцов наблюдались две формы разрушения (рис. 3).

Первая форма разрушения – складка образуется по поверхности образца под углом около 60° , обеспечивает возможность боковых и вертикальных смещений без нарушения связи между волокнами в направлении продольной оси образца.

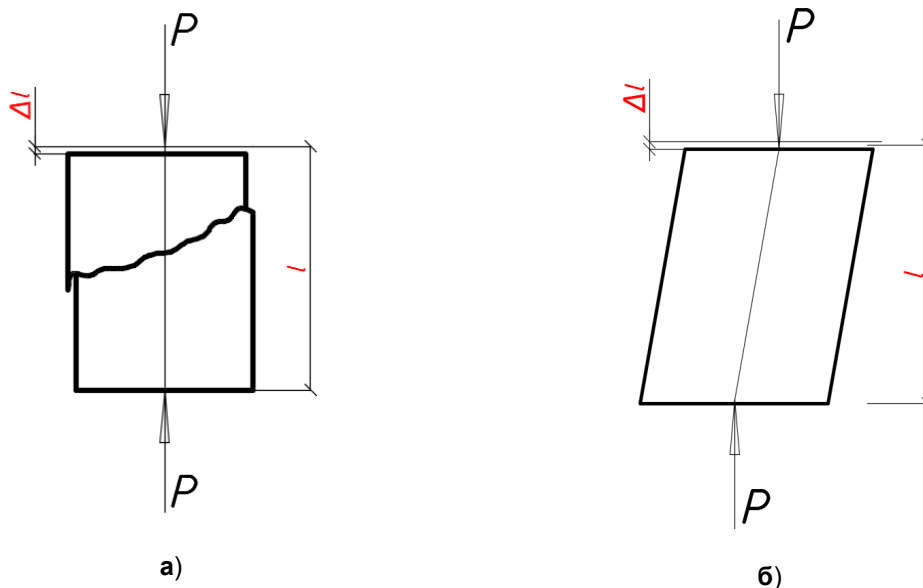


Рис.3: а – Первая форма разрушения образца при кратковременной нагрузке - складка по поверхности образца; б – Вторая форма разрушения - перекос в результате потери устойчивости формы образца (по данным исходного журнала испытаний 1981 г.)

Fig. 3: а – The first form of fracture of the sample under short-term load is a fold over the surface of the sample; б – The second form of fracture - skew as a result of loss of stability of the sample shape (according to the original test log of 1981)

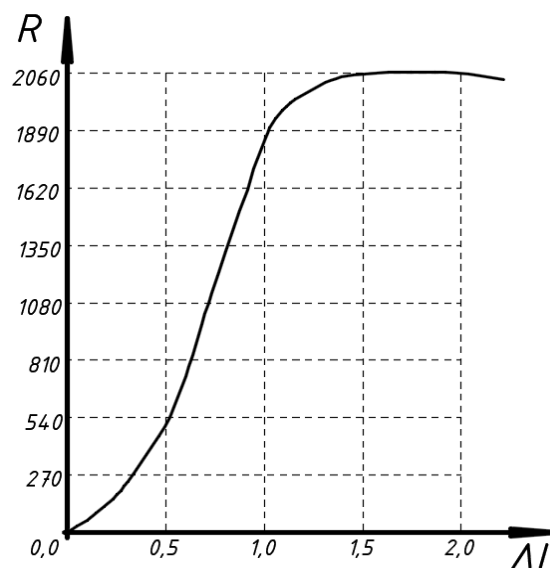


Рис.2. Характерная диаграмма «Нагрузка-перемещение» (по данным отчёта 1981 г.)

Fig. 2. Typical load-displacement diagram (according to the 1981 report)

С образованием складки наступает уравновешенная стадия разрушения образца, сопровождаемая понижением нагрузки на образец и увеличением общих деформаций образца при снижении его упругих свойств.

Вторая форма разрушения – перекося в результате потери устойчивости формы образца. Деформирование образца после возникновения перекося при общем увеличении деформаций вследствие неравномерного смятия торцов сопровождается уменьшением деформаций волокон образца за счет уменьшения нагрузки.

Таблица 2. Результаты испытаний на прочность при сжатии вдоль волокон заболонной части древесины, 2019 год

Table 2. Results of compressive strength tests along the grain of the sapwood, 2019

№ образца	Результат испытаний на прочность при сжатии вдоль волокон, кН
1a16	19,53
1a32	18,11
1a36	17,17
1a41	16,22
3a18	19,67
3a23	19,86
3a27	21,18
3a30	22,29
5614	18,68
5624	18,78
5627	19,74
5642	20,36

Таблица 3. Результаты испытаний прочности на сжатие вдоль волокон ядровой части древесины, 2019 г.

Table 3. Results of compressive strength tests along the grains of the core wood, 2019

№ образца	Результат испытания прочности на сжатие вдоль волокон, кН
1в6	22,36
1в8	20,09
1в13	22,32
1в17	22,15
1в19	24,19
1в24	24,82
1в27	23,88
1в22	22,79
1в38	27,34
8в4	31,93
8в7	30,05
8в12	30,81
8в18	31,8
8в22	30,08
8в25	31,79
8в28	30,64
8в31	30,85
8в35	28,87
8в42	24,14

Выводы

На основе полученных данных можно сделать вывод, что прочностные характеристики, выявленные вследствие экспериментов из ядровой и заболонной древесины сосны на образцах 20x20x30 в 1981 г. и в 2020 г. существенно отли-

чались от нормального, на это оказала влияние сравнительно небольшая выборка -10, 20, 11 и 12 результатов в каждой серии. Статистически достовер-

ного снижения предела прочности на сжатие как заболонной, так и ядровой сосны в течение прошедшего времени между экспериментами не установлено.

Список литературы

1. Теоретическое исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций зданий после реконструкции / С.В. Дубраков, О.И. Куценко, В.В. Андриенко, Н.В. Афанасьева, Д.Х. Галаева // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции: в 2 ч. Вологда: Научный центр «Диспут», 2016. С. 36-38.
2. Казачек В.Г. Проблемы нормирования сроков службы зданий и сооружений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2010. № 6. С. 56-71.
3. Оценка технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А.А. Смorchков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 70-75.
4. Смorchков А.А., Кереб С.А., Дубраков С.В. Учет длительного нагружения в расчетах деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство 2017. №3. С. 64-66.
5. Смorchков А.А., Орлов Д.А., Плюхин С.Г. Изменчивость прочности древесины сосны на сжатие вдоль волокон в зависимости от различных факторов // Молодежь и XXI век - 2013: матер. конф. Курск, 2013. Т. 3.
6. Травуш В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Длительная прочность и устойчивость сжатых стержней из древесины // Строительство и реконструкция. 2015. №5(61). С. 40-46.
7. 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(67). С. 60-68.
8. Масалов А.В., Мицкус Ю.А. Анализ методики испытаний арболита при сжатии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. Ч. 3. С.185-186.
9. Турковский С. Б., Погорельцев А. А., Скворцов Т. К. Использование клееных деревянных конструкций в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 1999. № 10. С. 30-32.

10. Ковальчук Л. М. Деревянные конструкции - проблемы и решения // Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 10. С. 13-14.
11. Деревянные конструкции в строительстве / Л. М. Ковальчук, С. Б. Турковский, Ю. В. Пискунов [и др.]. М.: Стройиздат, 1995. 248 с.
12. Турковский С. Б., Ломакин А. Д., Погорельцев А. А. Зависимость состояния клееных деревянных конструкций от влажности окружающего воздуха // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 3. С. 30-32.
13. Прокофьев А. С., Сморгачев А. А., Поветкин С. В. О расположении зубчатых соединений в изгибаемых клееных элементах // Известия вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1989. № 8. С. 24-27.
14. Миркин Л. М., Найштут Ю. С., Павлович С. А. Об оценке аварийного состояния деревянных конструкций // Методы расчета конструкций из древесины, фанеры и пластмасс: межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1985. С. 79-84.
15. Сморгачев А.А., Кереб С.А., Дубраков С.В. Устройства для оценки устойчивости деревянных стержней при ползучести // Проектирование и строительство: сборник тезисов докладов II региональной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и бакалавров. Курск, 2016. С. 66-70.
16. Сморгачев А.А., Кереб С.А., Дубраков С.В. Влияние длительной эксплуатации на несущую способность деревянных элементов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-2 (48). С. 137-139.
17. Влияние коэффициента вариации на надежность строительных конструкций / А.А. Сморгачев, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 164-167.
18. Совершенствование методов расчета элементов из цельной и клееной древесины при режимных нагрузках / А.А. Сморгачев, И.В. Потапова, Д.А. Сморгачев, Д.А. Орлов, А.С. Шевелёв // Современные деревянные конструкции. Теория. Практика. Эксперимент. СПб.: СПбГАСУ, 2010. С. 74-78.
19. Сморгачев А.А. Эксплуатационное состояние сохраняемых строительных конструкций. Курск, 2011. 138 с.
20. Оценка технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А. А. Сморгачев, С. А. Кереб, Д. А. Орлов, К.О. Барановская // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7. С. 70-75.

References

1. Dubrakov S.V., Kutsenko O. I., Andrienko V.V., Afanasyev N.V., Galaeva D.Kh. [Theoretical study of heat engineering properties of building envelopes after reconstruction]. *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-*

prakticheskoi konferentsii. [Science today: problems and development prospects. Materials of an international scientific and practical conference]. Vologda, 2016, pp. 36-38 (In Russ.).

2. Kazachek V.G. Problemy normirovaniya srokov sluzhby zdaniy i sooruzheniy [Problems of rationing the service life of buildings and structures]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* = *Bulletin of Polotsk State University. Series F: Building. Applied Science*, 2010, no. 6, pp. 56-71 (In Russ.).

3. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Orlov D.A., Baranovskaya K.O. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemyykh stroitel'nykh konstruksii zdaniy i sooruzheniy [Assessment of the technical condition of the operated building structures of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* = *Engineering magazine*, 2012, no. 7 (33), pp. 70-75 (In Russ.).

4. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Dubrakov S.V. Uchet dlitel'nogo nagruzheniya v raschetakh derevyannykh konstruksii [Taking into account long-term loading in the calculations of wooden structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* = *Industrial and Civil Construction*, 2017, no. 3, pp. 64-66 (In Russ.).

5. Smorchkov A.A., Orlov D.A., Plyukhin S.G. [The variability of the compressive strength of pine wood along the grain depending on various factors]. *Molodezh' i XXI vek - 2013*. Materialy konf. [Youth and the XXI century - 2013. Conference proceedings]. Kursk, 2013. Vol. 3 (In Russ.).

6. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Dlitel'naya prochnost' i ustoichi-vost' szhatykh sterzhnei iz drevesiny [Long-term strength and stability of compressed wood rods]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* = *Construction and Reconstruction*, 2015, no. 5 (61), pp. 40-46 (In Russ.).

7. 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 stability of rod elements of structural systems made of wood of various species under force and environmental loading in conditions of high humidity]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* = *Construction and Reconstruction*, 2016, no. 5 (67), pp. 60-68 (In Russ.).

8. Masalov A.V., Mitskus Yu.A. Analiz metodiki ispytaniy arbolita pri szhatii [Analysis of the compression test method for wood concrete]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2, pt. 3, pp. 185-186 (In Russ.).

9. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Skvortsov T.K. Ispol'zovanie kleenykh derevyannykh konstruksii v stroitel'stve [Use of glued wooden structures in construction]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* = *Industrial and Civil Construction*, 1999, no. 10, pp. 30-32 (In Russ.).

10. Kovalchuk L.M. Derevyannye konstruksii - problemy i resheniya [Wooden structures - problems and solutions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. = Industrial and Civil Construction*, 2001, no. 10, pp. 13-14 (In Russ.).
11. Kovalchuk L.M., Turkovsky S.B., Piskunov Yu. V. [et al]. *Derevyannye konstruksii v stroitel'stve* [Wooden structures in construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1995. 248 p. (In Russ.).
12. Turkovsky S.B., Lomakin A.D., Pogoreltsev A.A. Zavisimost' sostoyaniya kleenykh derevyannykh konstruksii ot vlazhnosti okruzhayushchego vozdukh [Dependence of the state of glued wooden structures on the humidity of the surrounding air]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. = Industrial and Civil Construction*, 2012, no. 3, pp. 30-32 (In Russ.).
13. Prokofiev A.S., Smorchkov A.A., Povetkin S.V. O raspolzhenii zubchatykh soedinenii v izgibaemykh kleenykh elementakh [On the location of gear joints in flexible glued elements]. *Izvestiya vuzov. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura = Izvestiya Vuzov. Ser. Construction and Architecture*, 1989, no. 8, pp. 24-27 (In Russ.).
14. Mirkin L.M., Naishtut Yu. S., Pavlovich S.A. [On the assessment of the emergency state of wooden structures: Interuniversity. topics]. *Metody rascheta konstruksii iz drevesiny, fanery i plastmass. Mezhdunarodnyy temat. sb. tr.* [Methods for calculating structures made of wood, plywood and plastics. Sat. tr.]. Leningrad, LISI Publ., 1985, pp. 79-84 (In Russ.).
15. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Dubrakov S.V. [Devices for assessing the stability of wooden rods during creep]. *Proektirovanie i stroitel'stvo. Sbornik tezisev dokladov II regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrantov i bakalavrov* [Design and construction. A collection of abstracts of the II regional scientific-practical conference of young scientists, graduate students, undergraduates and bachelors]. Kursk, 2016, pp. 66-70 (In Russ.).
16. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Dubrakov S.V. Dubrakov Vliyanie dlitel'noi ekspluatatsii na nesushchuyu sposobnost' derevyannykh elementov [The influence of long-term operation on the bearing capacity of wooden elements]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal*, 2016, no. 6-2 (48), pp. 137-139 (In Russ.).
17. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Orlov D.A., Baranovskaya K.O. Vliyanie koeffitsienta variatsii na nadezhnost' stroitel'nykh konstruksii [The influence of the coefficient of variation on the reliability of building structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 5 (50), pp. 164-167 (In Russ.).

18. Smorchkov A.A., Potapova I. V., Smorchkov D.A., Orlov D.A., Shevelev A.S. [Improvement of methods for calculating elements from solid and glued wood under regime loads]. *Sovremennye derevyannye konstruksii. Teoriya. Praktika. Eksperiment* [Modern wooden structures. Theory. Practice. Experiment]. Saint-Petersburg, 2010, pp. 74-78 (In Russ.).

19. Smorchkov A.A. *Ekspluatatsionnoe sostoyanie sokhranyaemykh stroitel'nykh konstruksii* [The operational state of the preserved building structures]. Kursk, 2011. 138 p. (In Russ.).

20. Smorchkov A.A., Kereb S.A., Orlov D.A., Baranovskaya K.O. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stroitel'nykh konstruksii zdaniy i sooruzhenii [Evaluation of the technical condition of the operating building structures of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Engineering and Construction Journal*, 2012, no. 7, pp. 70-75 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Солодилова Виктория Андреевна, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: masalow.al@yandex.ru

Victoria A. Solodilova, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: masalow.al@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-99-110>

Аэродинамика и теплообмен закрученного потока природного газа в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта

Н. П. Григорова ¹✉, П. В. Монастырев ², Е. Г. Пахомова ¹, Н. Е. Семичева ¹

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

² Тамбовский государственный технический университет
ул. Советская 106, г. Тамбов 392000, Российская Федерация

✉ e-mail: grigorowa.natalia2014@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Получить двухпараметрическую модель, характеризующую аэродинамические и теплообменные процессы, протекающие в вихревом теплообменном аппарате, дающие лучшее согласование расчетных и опытных значений коэффициента теплоотдачи с учетом кривизны движения закрученного потока газа в вихревом теплообменном аппарате, в котором в качестве источника тепловой энергии используется регулируемый перепад давления газа. Данное техническое решение позволит отказаться от установки автономных источников тепловой энергии, что снизит затраты на газ как топливо в системе отопления производственного помещения газораспределительного пункта (ГРП), а так же обеспечит более комфортные условия работы регулятора давления ГРП.

Методы. Комплексный анализ тепловых и гидравлических характеристик в вихревом теплообменном аппарате на основе известных теоретических положений и уравнений движения закрученного потока газа и теплообменных закономерностей.

Результаты. Получена зависимость, характеризующая интенсификацию теплообмена, базирующуюся на влиянии осевой и вращательной скорости, а также пути движения закрученного потока газа. Данная зависимость получена на основании комплексного анализа аэродинамических и теплообменных характеристик вихревого теплообменного аппарата, в котором в качестве источника тепловой энергии используется регулируемый перепад давления газа.

Заключение. Полученная двухпараметрическая модель позволяет получить наилучшее согласование расчетных значений коэффициента теплоотдачи со значениями, полученными опытным путем, которые использовались в теплотехническом расчете конструктивных параметров вихревого теплообменного аппарата.

Ключевые слова: природный газ; вихревой теплообменный аппарат; система отопления; газорегуляторный пункт; производственное здание.

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

Для цитирования: Аэродинамика и теплообмен закрученного потока природного газа в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта / Н.П. Григорова, П.В. Монастырев, Е.Г. Пахомова, Н.Е. Семичева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 99-110. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-99-110>.

Поступила в редакцию 20.03.2020

Подписана в печать 04.05.2020

Опубликована 30.06.2020

© Григорова Н.П., Монастырев П.В., Пахомова Е.Г., Семичева Н.Е., 2020

Aerodynamics and Heat Transfer of Swirling Natural Gas Flow in a Vortex Heat Exchanger of the Heating System of a Gas Control Point

Natalia P. Grigorova¹ ✉, Pavel V. Monastirev², Ekaterina G. Pakhomova¹,
Natalia E. Semicheva¹

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

² Tambov State Technical University,
106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russian Federation

✉ e-mail: grigorova.natalia2014@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. To obtain a two-parameter model characterizing the aerodynamic and heat exchange processes occurring in a vortex heat exchanger, giving a better agreement between the calculated and experimental values of the heat transfer coefficient taking into account the curvature of the swirling gas flow in a vortex heat exchanger, in which a controlled gas pressure drop is used as a source of thermal energy. This technical solution will make it possible to abandon the installation of autonomous sources of thermal energy, which will reduce the cost of gas as a fuel in the heating system of the industrial premises of the gas distribution point (GDP), as well as provide more comfortable working conditions for the hydraulic fracturing pressure regulator.

Methods. Comprehensive analysis of thermal and hydraulic characteristics in a vortex heat exchanger is based on well-known theoretical positions and equations of motion of a swirling gas flow and heat exchange laws.

Results. It is obtained a dependence that characterizes the intensification of heat transfer based on the influence of the axial and rotational speed, as well as the path of motion of the swirling gas flow. This dependence is obtained on the basis of a comprehensive analysis of the aerodynamic and heat exchange characteristics of a vortex heat exchanger, in which a controlled gas pressure drop is used as a source of thermal energy.

Conclusion. The obtained two-parameter model gives the best agreement of the calculated values of the heat transfer coefficient with the values obtained experimentally, which were used in the thermal engineering calculation of the design parameters of the vortex heat exchanger.

Keywords: natural gas; vortex heat exchanger; heating system; gas control point; operating building.

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

For citation: Grigorov N. P., Monastirev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E. Aerodynamics and Heat Transfer of Swirling Natural Gas Flow in a Vortex Heat Exchanger of the Heating System of a Gas Control Point. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 99-110 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2020-24-3-99-110](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-99-110).

Received 20.03.2020

Accepted 04.05.2020

Published 30.06.2020

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам энергосбереже-

ния и экологической безопасности в области топливно-энергетического комплекса зданий различного назначения, в

том числе и небольших производственных зданий [1, 2, 3, 4, 5].

В газорегуляторном пункте регуляторы давления работают на достаточно высоком, от 3,5 и более кратном, перепаде входного и выходного значений давления с не востребовавшим погашением избытка энергии. Погашение этого избыточного давления газа, поступающего из магистрали к потребителю [6, 7], возможно при применении вихревого теплообменного аппарата, который может использоваться в качестве элемента системы отопления помещения газораспределительного пункта.

Данное техническое решение позволит отказаться от установки автономных источников тепловой энергии, что даст возможность снизить затраты на топливо, уменьшить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, а также обеспечить более комфортные условия работы регулятора давления из-за уменьшения перепада регулируемого давления газа, поступающего к потребителю.

В статье [8] на основании значений коэффициента теплоотдачи на лопасти завихрителя, полученных в ходе экспериментальных исследований на лабораторной установке [9], был произведен теплотехнический расчет параметров конструкции вихревого теплообменника. На основании чего была подтверждена возможность использования вихревого теплообменного аппарата в качестве элемента системы отопления газорегуляторного пункта, в котором в

качестве источника тепловой энергии используется регулируемый перепад давления газа.

В связи с этим, возникла необходимость в получении двухпараметрических моделей, которые характеризуют аэродинамические и теплообменные процессы, протекающие в вихревом теплообменном аппарате, с целью получения значений коэффициента теплоотдачи на лопасти завихрителя, наиболее близких к экспериментальным данным.

Материалы и методы

Как известно, закрутка потока при различных граничных условиях приводит к увеличению коэффициента теплообмена, но одновременно увеличиваются энергетические затраты на продвижение теплоносителя по длине вихревого теплообменника¹ [10].

Движение природного газа в теплообменнике в виде вихревого потока характеризуется соизмеримыми значениями осевой и вращательной составляющих скорости, действием центробежных массовых сил, продольными и поперечными градиентами давления, критерием климатического подобия закрученных потоков [11].

Закручивание природного газа завихрителем придаёт потоку вращательную составляющую скорости, возник-

¹ Системы утилизации тепла вытяжного воздуха в общественных зданиях и сооружениях: Типовые материалы для проектирования. 904-02-24.86. Киев: ЦНМИЭП инженерного оборудования, 1988. 98 с.

новению в нём центробежных массовых сил и образованию радиального градиента статического давления. При этом вектор скорости потока отклоняется от осевого направления, а основной характеристикой закрученного течения является угол закрутки потока между вектором его суммарной скорости и осью теплообменника.

Вследствие уменьшения интенсивности закрутки по длине вихревого теплообменника статическое давление на стенке уменьшается, а в приосевой области возрастает. В пристенной области при этом имеет место течение с отрицательными продольными градиентами скорости и давления, а в приосевой – с положительными, что отличает закрученное течение от осевого.

Рассмотрим дифференциальные уравнения движения закрученного потока в теплообменнике в проекциях на оси X и φ в приближении к пограничному слою [12]:

$$\frac{\partial}{\partial r}(\rho\omega r) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\omega^2 r) = \frac{\partial}{\partial x}(P \cdot r) + \frac{\partial}{\partial r}(r \cdot \tau_{rx}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(\rho \cdot \omega \cdot \vartheta \cdot r) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot \omega \cdot u \cdot r^2) = \frac{\partial}{\partial r}(r^2 \cdot \tau_{r\varphi}), \quad (2)$$

где τ_{rx} и $\tau_{r\varphi}$ - касательные напряжения трения в осевом и тангенциальном направлениях.

Интегрируя эти уравнения по площади сечения, получим:

$$\frac{d}{dx} \int_0^R \rho\omega^2 r dr + \frac{d}{dx} \int_0^R P r dr = R\tau_{x\omega}, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \int_0^R \rho\omega u r^2 dr = -R^2 \tau_{\varphi\omega}. \quad (4)$$

Введём в решение момент количества движения потока M и количества его движения K_1 . Тогда выражения (3) и (4) примут вид:

$$\frac{d}{dx}(K_1 + K_p) = -4\pi R^2 \tau_{x\omega} \quad (5)$$

$$\frac{dM}{dx} = -4\pi R^2 \tau_{\varphi\omega}, \quad (6)$$

где $K_p = 2\pi \int_0^R P \cdot r \cdot dr$ - интеграл от сил давления;

$$K_1 = 2\pi \int_0^R \rho\omega^2 r dr \text{ и}$$

$$M = 2\pi \int_0^R \rho \cdot u \cdot \omega \cdot r^2 dr;$$

R – внутренний диаметр канала (вихревого теплообменника);

r, φ, x - цилиндрические координаты;

u, ω, ϑ - вращательная, осевая и радиальные скорости;

ρ - плотность закручиваемого потока природного газа.

Анализ уравнений (5) и (6) показывает, что интенсивность закрутки потока в вихревом теплообменнике, выполненном в виде трубы, может определяться только тремя безразмерными параметрами:

$$\Phi = \frac{M}{(K_1 + K_2)R}; \Phi' = \frac{M}{K_1 R};$$

$$\operatorname{tg}\varphi_{\omega} = \frac{\tau_{\varphi\omega}}{r_{x\omega}} = \frac{\tau_{\varphi\omega}}{r_{x\omega}}. \quad (7)$$

Первый параметр характеризует соотношение вращательного и полного количества движения в интегральной форме и используется при анализе аэро-

динамики закрученных струй. Второй параметр определяет соотношение вращательного и осевого количества движения в интегральной форме. Третий параметр является отношением поверхностных напряжений трения в направлениях φ и x и равен тангенсу предельного (поверхностного) угла закрутки потока.

Двухфазный закрученный поток сохраняет основные закономерности однофазного потока. Количественные отличия определяются плотностью и диаметром частиц, их объёмной концентрацией разностью скоростей фаз. В двухфазном потоке существенно возрастает поверхностное трение, уменьшаются толщины и области пристенного течения (пограничного слоя) в осевом и тангенциальном направлениях.

При течении закрученных потоков в трубах гидравлические потери обусловлены тремя составляющими: потерями на трение о стенку канала; потерями на трение в потоке вследствие поперечных градиентов скорости и давления, формированием зоны обратных течений и высокой турбулентности; выходными потерями, когда на выходе из трубы поток сохраняет закрутку.

В соответствии с уравнениями (5) и (6) для определения касательных напряжений трения в осевом $\tau_{x\omega}$ и тангенциальном $\tau_{\varphi\omega}$ направлениях, находим суммарное напряжение трения на внутренней стенке канала:

$$\tau_{\Sigma\omega} = \tau_{x\omega} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\omega}}, \quad (8)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{\omega} = \frac{\tau_{\varphi\omega}}{\tau_{x\omega}}$ - тангенс предельного угла закрутки на стенке канала.

Гидравлические потери закрученного потока определим на основе уравнения Бернулли, описывающего неравномерное по радиусу распределение скоростей и давлений. Тогда коэффициент гидравлического сопротивления равен:

$$\xi_{\varphi} = \frac{2\Delta E}{G\omega_{cp}^2}, \quad (9)$$

где E – энергия закрученного потока,

$$E = 2\pi \int_0^R P_{\text{пол}} \omega r dr;$$

$P_{\text{пол}}$ - полное давление потока теплоносителя;

ω_{cp} - средняя осевая скорость.

Потери энергии на единицу длины трубы характеризуются коэффициентом сопротивления:

$$\lambda_{\varphi} = \frac{2\Delta E}{\Delta \bar{x} G \omega_{cp}}, \quad (10)$$

где $\bar{x}$ - относительные координаты,

$$\bar{x} = \frac{x}{2R}.$$

Величины ξ_{φ} и λ_{φ} зависят от степени закрутки потока на входе и относительной длины трубы.

Теплообмен в вихревом теплообменнике с использованием сжатого воздуха хорошо исследован [13, 14] и характеризуется непосредственной близостью к завихрителю. Структура потока и закономерности теплообмена определяются способом начальной закрутки и

в диапазоне изменения среднего числа Re_x от 10^5 до 10^7 . Опытные данные обобщены уравнением [15, 16]:

$$Nu_x = 0,026(1 + \operatorname{tg} \varphi_{\text{вх}})^{0,77} \exp(0,42d_0^{-3}) \Phi Re^{0,8}, \quad (11)$$

где Φ - параметр, учитывающий изменение максимальной осевой скорости по длине трубы

$$\Phi = \frac{\omega_{\text{max}}}{(\omega_{\text{max вх}})^{0,8}};$$

$\varphi_{\text{вх}}$ - угол закрутки потока на входе.

Определяющим размером является расстояние X , определяющей температурой – среднемассовая температура в рассматриваемом сечении. В число Рейнольдса входит максимальная осевая скорость в сечении X .

На основном участке в вихревом теплообменнике закономерность теплообмена определяется только интенсивностью закрутки потока и в результате анализа известных теоретических положений [17, 18] и обработки экспериментальных данных получим уравнение подобия:

$$Nu_x = 0,029 Re^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_T \cdot \varepsilon_\varphi, \quad (12)$$

где ε_T - функция неизометричности,

$$\varepsilon_T = 2(\sqrt{\psi} + 1)^{1,6}$$

ψ - температурный фактор,

$$\psi = \frac{T_\omega}{T_f};$$

T_ω - температура стенки вихревой трубы;

T_f - температура газового потока.

Определяющим размером в этом уравнении является расстояние x , определяющей температурой – температура

вне области пристенного течения. В число Рейнольдса входит текущее значение максимальной осевой скорости.

Влияние закрутки на локальную теплоотдачу характеризуется относительной функцией:

$$\varepsilon_\varphi = 1 + 0,44 \cdot \Phi^{0,78}. \quad (13)$$

В этом случае теплообмен по длине вихревого теплообменника описывается уравнением

$$St_l = 0,0128 Re_T^{-0,25} Pr_l^{-0,75} \psi_\psi \psi_T, \quad (14)$$

где St_l - локальное число Стантона,

$$St_l = \frac{Nu}{Re_x Pr_l};$$

Re_T – тепловое число Рейнольдса, в котором определяющим размером является толщина пограничного слоя вихревой трубы δ_T [19];

$$\psi_T = \left[\frac{2}{(\sqrt{\Phi} + 1)} \right]^2 - \text{фактор неизотермичности.}$$

Относительная функция закрутки характеризуется уравнением

$$\psi_\varphi = 1 + 0,57 \cdot \Phi. \quad (15)$$

Уравнение (15) используется при решении интегрального уравнения энергии, что позволяет получить уравнение подобия для различных законов изменения температуры стенки вихревого теплообменника по его длине.

Учитывая винтовой характер движения теплоносителя, а также данные о физической структуре природного газа, запишем уравнение подобия:

$$Nu_s = C Re_s^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_T \varepsilon_s, \quad (16)$$

где $Nu_s = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda}$ - критерий теплообмена по внутренней поверхности вихревого теплообменника;

$$Re_s = \frac{\omega \cdot S}{\eta} - \text{число Рейнольдса по}$$

длине S винтовой линии у внутренней поверхности в области пристенного течения;

ε_T и ε_S – функции, определяющие влияние турбулентности и кривизны винтовой линии при перемещении природного газа.

Так как длина винтовой линии $S = x\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\omega}$, $\omega = \omega_{cp}\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\omega}$, то уравнение (16) примет вид:

$$\frac{Nu_x}{Nu_0} = \omega_{cp}^{0,8} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\omega)^{0,4} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\omega)^{-0,1} \varepsilon_S, \quad (17)$$

где ω_{cp} - средняя осевая скорость потока природного газа в вихревом теплообменнике.

Числа Нуссельта в левой части уравнения (17) определены по продольному размеру (x), т.е. длине вихревого теплообменника, при этом число Nu_0 характеризует теплообмен при осевом течении в вихревом теплообменнике при том же значении среднерасходного числа Рейнольдса.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, левая часть уравнения (17) характеризует общую интенсификацию теплообмена в трубах с закруткой потока, а правая часть – определяющие эту интенсификацию.

Параметр $\omega_{cp}^{0,8}$ - определяет увеличение теплообмена вследствие возрастания осевой скорости около стенки. Член уравнения $(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\omega)^{0,4}$ - характеризует увеличение теплообмена из-за появления вращательной скорости, а член $(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\omega)^{-0,1}$ - уменьшение теплообмена из-за возрастания пути движения закрученного потока теплоносителя.

Значения коэффициента теплоотдачи, полученные опытным путем в ходе экспериментальных исследований на лабораторной установке и рассчитанные с учетом кривизны движения потока газа на лопасти завихрителя согласно уравнению (17) показывают относительную сходимость полученных результатов (табл. 1). Среднеарифметическая погрешность полученных результатов составляет 2%, что находится в области допустимых отклонений.

Выводы

Таким образом, выполненные расчёты закрученного течения для вихревого теплообменного аппарата показали, что применение двухпараметрической модели позволило получить расчетные значения коэффициента теплоотдачи, наиболее близкие к экспериментальным значениям. Результаты выполненных расчётов для течения в трубе с закруткой в одно и противоположные направления показывают, что учёт кривизны позволяет получить лучшее согласование расчётных и опытных значений коэффициента теплоотдачи на лопасти завихрителя.

Таблица 1. Сравнительная характеристика опытных и расчётных значений коэффициента теплоотдачи на поверхности лопасти завихрителя вихревого теплообменного аппарата

Table 1. Comparative characteristics of the experimental and calculated values of the heat transfer coefficient on the surface of the swirler blade of a vortex heat exchanger

Температура теплоносителя перед контактом t , °C / Coolant temperature before contact t , °C	Температура испарения $t_{и}$, °C / Evaporation temperature t_e , °C	Коэффициент теплоотдачи, расчётный α_p , Вт/(м ² ·°C) / Thermolysis coefficient calculated, α_c , Wt/(m ² ·°C)	Количество испаряющейся жидкости W , г / Amount of the evaporating liquid W , g	Температурный напор охлаждённого теплоносителя, °C / Cooled coolant temperature head, °C	Тепло, отбираемое от теплоносителя Q , Дж / Heat removed from coolant Q , J	Теплота испарения rW , кДж/кг / Vaporization heat, rW , kJ/kg	Коэффициент теплоотдачи, опытный $\alpha_{оп}$, Вт/(м ² ·°C) / Thermolysis coefficient, experimented α_{on} , Wt/(m ² ·°C)	Теплота конвекции Q_k , Дж / Convection warmth, Q_k , J
5	5,2	48,35	8,4	0,68	6,807	5,823	48,35	0,984
10	10,2	48,40	8,6	0,69	6,907	5,913	48,85	0,994
15	15,6	48,34	8,8	0,69	6,407	6,017	49,22	0,890
20	20,3	48,33	8,8	0,70	7,007	6,055	49,56	0,953
25	25,3	48,30	9,1	0,71	7,107	6,153	49,65	0,954
30	30,4	48,27	8,9	0,69	6,907	6,008	49,72	0,899
35	35,4	48,19	8,8	0,69	6,807	9,905	49,86	0,902
40	40,2	48,00	9,0	0,70	7,707	5,992	49,90	1,015

Примечание: массовый расход теплоносителя G , кг/с; диаметр «пятна» жидкости $d_n=0,12$ м; теплоемкость теплоносителя $C_{в.2}=1,05$ кДж/(кг·К); средняя плотность $1,44$ кг/м³.

Данное техническое решение позволит отказаться от установки автономных источников тепловой энергии, что снизит затраты на газ как топливо в системе

отопления производственного помещения газораспределительного пункта (ГРП), а так же обеспечит более комфортные условия работы регулятора давления ГРП.

Список литературы

1. Optimization of thermal modernization of a group of buildings using simulation modeling / K.O. Dubrakova, P.V. Monastirev, R.Y. Klychnikov, V.A. Yezerskiy // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Vol. 17. Is. 2. P. 192-197.
2. Mishchenko E., Monastirev P., Evdokimtsev O. Quality Improvement of Specialists Training for Energy-Efficient Construction. 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 463 032046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032046>

3. Ерофеев А.В., Ярцев В.П., Монастырев П.В. Декоративно-защитные плиты для фасадной отделки зданий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 1 (367). С. 101-104.
4. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырев П.В. Теплопроводность минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 1. С.48-49.
5. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырев П.В. Изменение линейных размеров минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 8. С.32-34.
6. Пат. 2615878 Российская Федерация: МПК F 28 D 7/10. Вихревой теплообменный элемент / Кобелев Н.С., Григорова Н.П. [и др.]; заявитель и патентообладатель Курск. гос. техн. ун-т. №2016110870; заявл. 04.07.2016; опубл. 11.04.2017, Бюл. № 11.
7. Пат. 2622340 Российская Федерация: МПК F 28 D 7/10. Вихревой теплообменный элемент / Кобелев Н.С., Григорова Н.П. [и др.]; заявитель и патентообладатель Курск. гос. техн. ун-т. №2016128870953; заявл. 15.07.2016; опубл. 14.06.2017, Бюл. № 17.
8. Теплотехнический расчет конструктивных параметров вихревого теплообменного аппарата системы отопления газорегуляторного пункта / Н.П. Григорова, П.В. Монастырев, Е.Г. Пахомова, Н.Е. Семичева // Журнал БСТ. Технология и организация строительства. Наука 2.1. 2020. №8. С. 45-49.
9. Григорова Н.П., Монастырев П.В. Экспериментальное исследование влияния мелкодисперсной капельной влаги и загрязнений в теплоносителе на коэффициент теплоотдачи вихревого теплообменника системы отопления газорегуляторного пункта // Современные концепции техники и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Чебоксары, 2020. С. 1-5. URL: <https://interactive-plus.ru/ru/article/>
10. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 336 с.
11. Поляков А.А., Канава В.А. Теплообменные аппараты в инженерном оборудовании зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1989. 200 с.
12. Дрейцер Г.А. Основы конвекционного теплообмена в каналах. М.: Издательство МАМ, 1989. 84 с.
13. Аметистов Е.В, Григорьев В.А., Зорина В.М. Тепло и массообмен. Теплотехнической эксперимент: справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
14. Штым, А.М. Аэродинамика циклонно-вихревых камер. Владивосток, 1985. 197 с.
15. Гордов А.Н., Жегулло О.М., Иванов А.Г. Основы температурных изменений. М.: Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
16. Никитин Ю.М., Покровский Ю.Ю., Пауков Е.И. Интенсификация конвективного теплообмена с помощью одно и четырёхзаходной искусственной шероховатости // Промышленная теплотехника. 1984. № 6. 35. С. 26–28.

17. Воронин Г.М., Дубровский Е.В. Эффективные теплообменники. М.: Машиностроение, 1973. 96 с.
18. Уонг Ч. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
19. Ленивеч Ф. Измерение температур в технике. М.: Металлургия, 1980. 118 с.

References

1. Dubrakova K. O., Monastirev P. V., Klychnikov R. Y., Yezerskiy V. A. Optimization of thermal modernization of a group of buildings using simulation modeling. *Journal of Applied Engineering Science*, 2019, vol. 17, is. 2, pp. 192-197.
2. Mishchenko E., Monastirev P., Evdokimtsev O. Quality Improvement of Specialists Training for Energy-Efficient Construction. 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 463 032046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032046>
3. Erofeev A.V., Yartsev V. P., Monastirev P. V. Dekorativno-zashchitnye plity dlya fasadnoi otdelki zdaniy [Decorative and protective plates for facade finishing of buildings. News of higher educational institutions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti = Technology of the Textile Industry*, 2017, no. 1 (367), pp. 101-104 (In Russ.).
4. Gusev B. V., Yezerskiy V. A., Monastirev P. V. Teploprovodnost' mineralovatnykh plit v usloviyakh ekspluatatsionnykh vozdeistvii [Thermal conductivity of mineral wool slabs under operating conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Construction*, 2005, no. 1, pp. 48-49 (In Russ.).
5. Gusev B. V., Yezerskiy V. A., Monastirev P. V. Izmenenie lineinykh razmerov mineralovatnykh plit v usloviyakh ekspluatatsionnykh vozdeistvii [Changing the linear dimensions of mineral wool slabs under operating conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Construction*, 2004, no. 8, pp. 32-34 (In Russ.).
6. Kobelev N. S., Grigorova N. P. [et al.]. *Vikhrevoi teploobmennyy element* [Vortex heat exchange element]. Patent RF, no. 2615878, 2017 (In Russ.).
7. Kobelev N. S., Grigorova N. P. [et al.]. *Vikhrevoi teploobmennyy element* [Vortex heat exchange element]. Patent RF, no. 2622340, 2017 (In Russ.).
8. Grigorova N. P., Monastirev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E. Teploekhnicheskii raschet konstruktivnykh parametrov vikhrevogo teploobmen-nogo apparata sistemy otopleniya gazoregulyatornogo punkta [Heat engineering calculation of design parameters of the vortex heat exchanger of the gas control point heating system]. *Zhurnal BST. Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva. Nauka 2.1. = Technology and Organization of Construction. Nauka 2.1*, 2020, no. 8, pp. 45-49 (In Russ.).

9. Grigorova N. P., Monastirev P. V. [Experimental study of the influence of fine drop-let moisture and contamination in the coolant on the heat Transfer Coefficient of the vortex heat exchanger of the gas control point heating system]. *Sovremennye kontseptsii tekhniki i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy* [Modern concepts of engineering and technology: problems, state and prospects]. Tchboksary, 2020, pp. 1-5 (In Russ.). Available at: <https://interactive-plus.ru/ru/article>
10. Goldshtik M. A. *Vikhrevye potoki* [Vortex flows]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 336 p. (In Russ.).
11. Polyakov A. A., Kanava V. A. *Teploobmennye apparaty v inzhenernom oborudovanii zdaniy i sooruzhenii* [Heat exchangers in engineering equipment of buildings and structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 200 p. (In Russ.).
12. Dreytser G. A. *Osnovy konveksionnogo teploobmena v kanalakh* [Fundamentals of convection heat transfer in channels]. Moscow, 1989. 84 p. (In Russ.).
13. Ametistov E. V., Grigoriev V. A., Zorina V. M. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskoi eksperiment* [Heat and mass transfer. Heat engineering experiment]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p. (In Russ.).
14. Stam A. M. *Aerodinamika tsiklonno-vikhrevykh kamer* [Aerodynamics of cyclone-vortex chambers]. Vladivostok, 1985. 197 p. (In Russ.).
15. Gordov A. N., Zhegullo O. M., Ivanov A. G. *Osnovy temperaturnykh izmenenii* [Fundamentals of temperature changes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 304 p. (In Russ.).
16. Nikitin Yu. M., Pokrovsky Yu. Y., Paukov E. I. Intensifikatsiya konvektivnogo teploobmena s pomoshch'yu odno i chetyrekhzakhodnoi iskusstvennoi sherokhovatosti [Intensification of convective heat transfer using one-and four-pass artificial roughness]. *Promyshlennaya teplotekhnika = Industrial Heat Engineering*, 1984, no. 6. 35, pp. 26–28 (In Russ.).
17. Voronin G. M., Dubrovsky E. V. *Effektivnye teploobmenniki* [Effective heat exchangers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 96 p. (In Russ.).
18. Wong C. *Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov* [Basic formulas and data on heat transfer for engineers]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 216 p. (In Russ.).
19. Lenivech F. *Izmerenie temperatur v tekhnike* [Measuring temperatures in engineering]. Moscow, Metallurgy Publ., 1980. 118 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Григорова Наталья Павловна, аспирант кафедры теплогазоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Natalia P. Grigороva, Post-Graduate Student of Heat and Gas Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Монастырев Павел Владиславович, доктор технических наук, директор института Архитектуры, строительства и транспорта, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: monasteryrev68@mail.ru

Pavel V. Monastyrev, Dr. of Sci. (Engineering) Rector of the Institute of Architecture, Construction and Transport, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: monasteryrev68@mail.ru

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

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

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой теплогазоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Natalia E. Semicheva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Heat and Gas Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-111-120>**Анализ линейчатых поверхностей строительных конструкций****С.Н. Волкова¹, А.В. Шлеенко² ✉, В.В. Морозова¹, Е.Е. Сивак¹**

¹ Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова,
ул. Карла Маркса 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

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

✉ e-mail: shleenko77@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в анализе практики применения поверхностей, образованных движением прямой, так называемой линейчатой. Известно, что среди поверхностей второго порядка прямолинейными образующими обладают: конусы, цилиндры, однополостные гиперболоиды и гиперболические параболоиды, а также линии, представленные в полярной системе координат в виде замысловатых фигур, которые в пространстве можно представить вышеперечисленными поверхностями, добавив третье измерение. Прочность, получающаяся в результате покрытия каждой точки перечисленных поверхностей прямыми из разных семейств, не утяжеляет конструкцию, а укрепляет и делает ее легкой по сравнению с монолитами без укреплений из других материалов, в которых устойчивость не основана на формулах расчета Шухова.

Методы. Нахождение семейств прямолинейных образующих для поверхностей второго порядка, в основе расчетов которого лежит разделение уравнений, представляющих поверхность второго порядка в виде разности квадратов в одной из частей уравнения, и в виде произведения с произвольным параметром в другой его части.

Результаты. Проводя анализ поверхностей второго порядка, приходим к выводу, что такой методикой расчетов Шухова подтверждены: конусы, цилиндры. Уравнение вида $F(x, y) = 0$ в пространстве определяет цилиндрическую поверхность, у которой образующие параллельны оси oz . Аналогично $F(x, z) = 0$ определяют цилиндрическую поверхность с образующими, параллельными оси ou и $F(y, z) = 0$ – цилиндрическая поверхность с образующими, параллельными оси ox . Однополостный гиперболоид, гиперболический параболоид, т.е. 10 поверхностей из 14, составляют более 70%.

Заключение. В результате применения приводимых формул для расчета упрочненных строительных конструкций городские здания приобретут новый облик, что создаст комфортную среду для проживания жителей, а также приведет к экономии материальных ресурсов в строительстве.

Ключевые слова: строительство; прямолинейные образующие; поверхности второго порядка; прочность; легкость; строительная техника; архитектура; упрочненные конструкции; моделирование.

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

Для цитирования: Анализ линейчатых поверхностей строительных конструкций / С.Н. Волкова, А.В. Шлеенко, В.В. Морозова, Е.Е. Сивак // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 111-120. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-111-120>.

Поступила в редакцию 05.03.2020

Подписана в печать 23.04.2020

Опубликована 30.06.2020

© Волкова С.Н., Шлеенко А.В., Морозова В.В., Сивак Е.Е., 2020

Analysis of Linear Surfaces of Building Structures

Svetlana N. Volkova¹, Aleksey V. Shleenko² ✉, Victoria V. Morozova¹,
Elena E. Sivak¹

¹ Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov,
70 Karla Marksa str., Kursk 305021, Russian Federation

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

✉ e-mail: shleenko77@mail.ru

Резюме

Purpose of research is to analyze the practice in the application of surfaces formed by the movement of a straight line. It is known that among the second-order surfaces cones, cylinders, hyperboloids of one sheet and hyperbolic paraboloids, as well as lines represented in the polar coordinate system in the form of intricate shapes that can be represented in space by the above-mentioned surfaces, adding a third dimension, have rectilinear generators. The strength resulting from covering each point of the listed surfaces with straight lines from different families does not make the structure heavier but strengthens it and makes it light compared to monoliths without reinforcements made of other materials, in which stability is not based on Shukhov calculation formulas.

Methods Finding families of rectilinear generators for second-order surfaces calculation of which is based on the separation of equations that represent a second-order surface as a difference of squares in one part of the equation and as a product with an arbitrary parameter in the other part.

Results. Analyzing second-order surfaces, we came to the conclusion that cones, cylinders are prone to this method of Shukhov calculations; equation of the form $F(x, y) = 0$ in space defines a cylindrical surface whose generators are parallel to axis oz . Similarly, $F(x, z) = 0$ defines a cylindrical surface with generators parallel to axis oy and $F(y, z) = 0$ is a cylindrical surface with generators parallel to axis ox . A hyperboloid of one sheet, hyperbolic paraboloid, i.e. 10 surfaces out of 14, make up more than 70%.

Conclusion. As a result of applying these formulas for calculating reinforced building structures, city buildings will acquire a new appearance, which will create a comfortable environment for residents, as well as lead to saving construction material resources.

Keywords: construction; rectilinear generator; second order surfaces; strength; lightweight; construction engineering; architecture; reinforced structure; modeling.

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

For citation: Volkova S. N., Shleenko A. V., Morozova V. V., Sivak E. E. Analysis of Linear Surfaces of Building Structures // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 111-120 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-111-120>.

Received 05.03.2020

Accepted 23.04.2020

Published 30.06.2020

Введение

Строительные конструкции в будущем можно себе представить легкими, но не уступающими по прочности

кристаллу. Для этого уже сегодня существует технология получения новых строительных материалов, облученных пучком ускоренных электронов, исследования которых проводились еще в 90-

х годах XX в. [1-3]. Но мы хотим остановиться на технологии, предложенной и незаслуженно забытой еще в начале 19 века, а именно в 1896 году Владимиром Григорьевичем Шуховым [4,5]. Знаменательно то, что, когда писалась эта статья, в г.Москве проходила выставка, посвященная Шухову и называлась она «Формула архитектуры». Принципы работы по-новому должны включать в себя прежде всего прочность и надежность конструкций [6,7], красоту и легкость [8,9], гибкость и пластичность [10, 11], учитывая уже созданную архитектуру. Целью нашего исследования является возрождение забытой методики расчета для упрочнения поверхностей второго порядка, используемых в строительстве.

Материалы и методы

Нахождение семейств прямолинейных образующих для поверхностей второго порядка, в основе расчетов которого лежит разделение уравнений, представляющих поверхность второго порядка в виде разности квадратов в одной из частей уравнения, и в виде произведения с произвольным параметром в другой его части. Например, однополостный гиперболоид в виде (п.4.2. табл.1)

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (1)$$

можно записать в виде:

$$x \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 - \frac{z^2}{c^2}. \quad (2)$$

А затем разложить на множители, применив разность квадратов с одной стороны и с другой.

$$\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right) \left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) = \left(1 + \frac{z}{c}\right) \left(1 - \frac{z}{c}\right). \quad (3)$$

Вводим произвольное число κ , которое при определенном значении это уравнение представит в виде прямой линии.

$$\begin{cases} \frac{x}{a} + \frac{y}{b} = \kappa \left(1 + \frac{z}{c}\right), \\ \frac{x}{a} - \frac{y}{b} = \frac{1}{\kappa} \left(1 - \frac{z}{c}\right) \end{cases} \quad (4)$$

или

$$\begin{cases} \frac{x}{a} + \frac{y}{b} = l \left(1 - \frac{z}{c}\right), \\ \frac{x}{a} - \frac{y}{b} = \frac{1}{l} \left(1 + \frac{z}{c}\right) \end{cases}. \quad (5)$$

Меняя параметры κ и l , получим совокупность прямых (семейство прямых).

Уравнение (4) и (5) составляем так, что почленное перемножение их дает уравнение поверхности (1). Таким образом, любая точка М (х, у, z), координаты которой удовлетворяют системе (4), (5) находятся на поверхности (3). Следовательно, каждые из прямых семейств целиком располагаются на поверхности однополостного гиперболоида.

Результаты и их обсуждение

Проводя анализ поверхностей второго порядка, а их девять типов (табл. 1), если сферу считать распрявленным эллипсоидом, в котором $a=b=c=R$, то

приходим к выводу, что такой методикой расчетов Шухова подвержены: конусы (п.3 табл.1), цилиндры (п.2 табл.1), уравнения вида $F(x,y)=0$ в пространстве определяет цилиндрическую поверхность, у которой образующие параллельны оси oz . Аналогично $F(x,z)=0$ определяют цилиндрическую поверхность с образующими, параллельными оси ou и $F(y;z)=0$ – цилиндрическая поверхность с образующими, параллельными оси ox . Однополостный гиперболоид (п.4.3 табл.1), гиперболический параболоид (п.5 табл.1), т.е. 10 поверхностей из 14, т.е. $\frac{10}{14} = \frac{5}{7} = 0,71$, т.е. больше 70%.

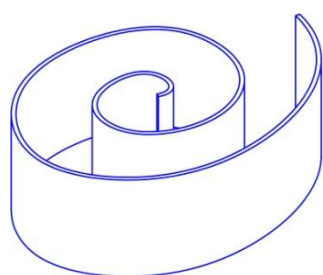
В последнее время застройщики в работе применяют прямоугольные формы с плоскими крышами, а ведь можно делать дома различной формы и с причудливым рисунком крыш наверху, устремленным в космическое пространство.

Пора уходить от стереотипов и строить разнообразные объекты, интересные в архитектурном и конструкторском решении. Начать хотя бы с детских садов и площадок, школ и т. д. В одной из работ авторы уже касались темы графического моделирования, функций в полярной системе координат [4]. Так вот, представляя в пространстве цилиндрические поверхности, возможно с помощью методики Шухова рассчитать семейство прямолинейных образующих для них и получить объекты различной

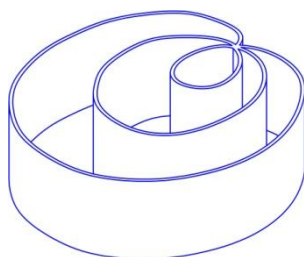
формы с отдельными входами и выходами, как внешними, так и внутренними. Оранжереи можно делать различной формы, а с учетом прочности и различной высоты, хорошо освещенные солнцем.

В полярной системе координат легко выполнимы такие линии, как спираль Архимеда, логарифмическая спираль, улитка Паскаля, четырехлепестковая роза и другие. В пространстве они будут выглядеть в виде цилиндрических поверхностей не имеющих общих точек соприкосновения (спираль Архимеда, логарифмическая спираль) и имеющих общие точки (улитка Паскаля, четырехлепестковая роза). Их удобно представить в цилиндрической системе координат, в которой точка определяется координатами (ρ, φ, H) . Значения координат ρ и φ как в полярной системе, а H – высота, т.е. вертикаль (рис. 1).

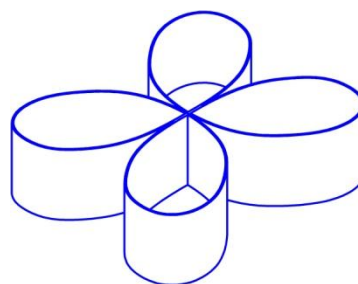
С выбором координат и методикой расчетов Шухова по-новому можно взглянуть на вопросы, связанные с прогнозированием и числовыми характеристиками непрерывных циклических процессов [12], использование свойств рядов предпочтительных чисел для увеличения надежности расчетов и качества прогнозов при проектировании и расчете строительных конструкций [13, 14, 15], анализом инновационной деятельности строительной организации, усовершенствованием пути к высоким стандартам жизни.



1. Спираль Архимеда /
Archimedes spiral



2. Улитка Паскаля /
Pascal snail



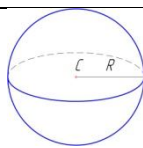
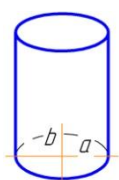
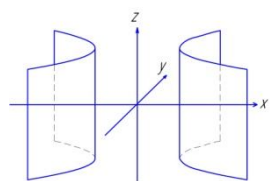
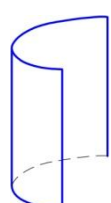
3. Четырехлепестковая роза /
Four-petal rose

Рис.1. Поверхности линий в цилиндрической системе координат

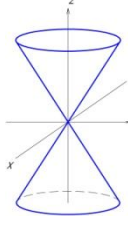
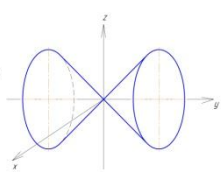
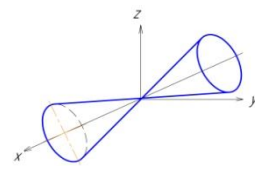
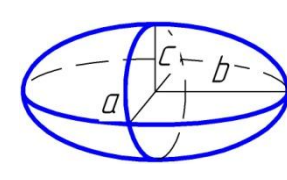
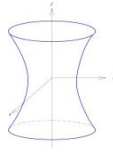
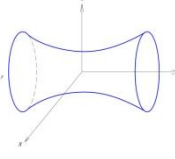
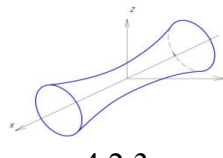
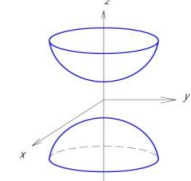
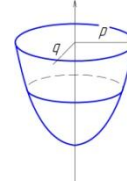
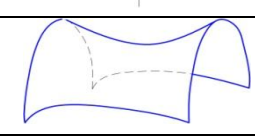
Fig. 1. Surfaces of lines in a cylindrical coordinate system

Таблица 1. Поверхности второго порядка

Table 1. Second order surfaces

n/n	Поверхность второго порядка / Second order surface	Уравнение / Equation	График / Schedule
1	Сфера	$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = R^2$, где $C(a,b,c)$ - центр, R -радиус	
2	Цилиндрическая поверхность	$F(x,y)=0, F(x,z)=0, F(y,z)=0$	 2.1.  2.2.  2.3.
2.1	Эллиптический цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	
2.2	Гиперболический цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$	
2.3	Параболический цилиндр	$y^2 = 2px; x^2 = 2py$	

Окончание табл. 1 / Table 1 (ended)

n/n	Поверхность второго порядка / Second order surface	Уравнение / Equation	График / Schedule
3	Конусы второго порядка Вершина в начале координат, ось – oz Ось – oy Ось – ox	$F(x,y,z)=0,$ $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$	 3.1.
3.1		$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$	 3.2.
3.2		$-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0$	 3.3
3.3			
4.	Поверхности вращения:	$F(\sqrt{x^2 + y^2}, z) = 0$	
4.1	Эллипсоид (трехосный)	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	
4.2	Однополостный гиперболоид Ось вращения oz Ось вращения oy Ось вращения ox	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ $-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	 4.2.1.
			 4.2.2.
			 4.2.3.
4.3	Двуполостный гиперболоид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1$	
4.4	Эллиптический параболоид	$\frac{x^2}{p} + \frac{y^2}{q} = 2z \cdot (p > 0, q > 0)$	
5	Гиперболический параболоид	$\frac{x^2}{p} - \frac{y^2}{q} = 2z \cdot (p > 0, q > 0)$	

Активизировать работу по моделированию инновационной деятельности строительных организаций [6] в направлении отечественных изобретений, в основе парадоксов [7] увидеть новые решения старых проблем [8], а именно путем многообразия форм [9], используя это при подготовке специалистов в области проектирования и строительства [10,11].

В заключение следует отметить, что оставшиеся 30% от поверхностей второго порядка, которые не получаются методом расчета, описанного в статье, можно разбить на поверхности, которые легко упрочить по технологии, предложенной Шуховым. Таким образом, надежность и красота будущего находится в руках настоящего, своими истоками, уходящими в прошлое.

Выводы

Исследованные поверхности второго порядка позволят изготавливать прочные строительные конструкции с экономией материалов.

Полученный Шуховым метод применим более чем к 70% поверхностей второго порядка, что является достоверной перспективой широкого использования в строительной технике при проектировании новых высотных сооружений.

Данный подход позволит укреплять детали и строительные конструкции не только напыленным дорогостоящим материалом, но и конструируя защитный слой в виде каркасов, состоящих и образующих прямых, проходящих через определенные точки поверхностей, используемых в строительстве.

Список литературы

1. Бредихин В.В., Шлеенко А.В., Бредихина Н.В. Развитие производственно-технического потенциала строительной отрасли. Курск, 2016. 114 с.
2. Voskoglou M. A. Note on the Graphical Representation of the Derivatives // Physical and Mathematical Education: scientific journal. 2017. Is. 2(12). P. 9-16.
3. Pramod Kumar Pandey. A numerical technique for the solution of general eighth order boundary value problems: a finite difference method // Ural mathematical journal. 2018. Vol. 4. № 1. P. 56-62.
4. Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Пашкова М.И. Использование отходов горнодобывающего региона КМА для изготовления новых строительных материалов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3 (16). С. 111-114.
5. Шлеенко А.В., Волкова С.Н., Сивак Е.Е. Оптимизация выборки для постановки научного эксперимента технологического процесса строительства // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 46-48.

- 6 Pandey P.K. Fourth Order Finite Difference Method for Sixth Order Boundary Value Problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2013. Vol. 53. № 1. P. 57-62. <https://doi.org/10.1134/S0965542513010107>
7. Viswanadham K.N.S.K., Ballem S. Numerical solution of eighth order boundary value problems by Galerkin method with quintic B-splines // International Journal of Computer Applications. 2014. Vol. 89. № 15. P. 7-13. <https://doi.org/10.5120/15705-4562>.
8. Шлеенко А.В., Волкова С.Н. Анализ инновационной деятельности строительной организации // Известия Курского государственного технического университета. 2011. № 5-2(38). С. 363-367.
9. Reddy S.M. Numerical solution of eighth order boundary value problems by Petrov-Galerkin method with quintic B-splines as basic functions and septic B-splines as weight functions // International Journal of Engineering and Computer Science. 2016. Vol. 5, № 09. P. 17894-17901. URL: <http://ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/2439/2254>
10. Jiang Z. W. "A meshfree method for numerical solution of nonhomogeneous time dependent problems," Abstract Appl. Anal., Article ID 978310 (2014).
11. Voloshinov D.V. Constructive geometric modeling. Theory, practice, automation: monograph. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2010. 355 p.
12. Vabishchevich P. N., Vasil'ev V. I., Vasil'eva M. V. Computational identification of the right hand side of a parabolic equation // Comput. Math. Math. 2015. Phys. 55. № 9. P. 1015-1021.
13. Kenneth S. Schmitz Chapter 1: Philosophy of Science // Physical Chemistry. 2018. P.183-367.
14. Philip L. Marston Geometrical and Catastrophe Optics Methods in Scattering // Physical Acoustics. 1992. Vol. 21. P. 1-234.
15. Kenneth S. Schmitz Chapter 1: Philosophy of Science // Physical Chemistry. 2018. P.183-367.

References

1. Bredikhin V. V., Shleenko A.V., Bredikhina N. V. *Razvitie proizvodstvenno-tekhnicheskogo potentsiala stroitel'noi otrasli* [Development of technological capacity of construction branch]. Kursk, 2016. 114 p. (In Russ.).
2. Voskoglou M. A note on the graphical representation of the derivatives. *Physical and Mathematical Education: scientific journal*, 2017, is. 2(12), pp.9-16.
3. Pramod Kumar Pandey. A numerical technique for the solution of general eighth order boundary value problems: a finite difference method. *Ural mathematical journal*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 56-62.

4. Shleenko A.V., Volkova S.N., Pashkova M.I. Ispol'zovanie otkhodov gornodobyvayushchego regiona KMA dlya izgotovleniya novykh stroitel'nykh materialov [Use of waste of the mining region of KMA for production of new construction materials]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2015, no. 3 (16), pp. 111-114 (In Russ.).
5. Shleenko A.V., Volkova S.N., Sivak E.E. Optimizatsiya vyborki dlya postanovki nauchnogo eksperimenta tekhnologicheskogo protsessa stroitel'stva [Optimization of selection for statement of a scientific experiment of technological process of construction]. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of the Construction Equipment*, 2018, no. 11 (1011), pp. 46-48 (In Russ.).
6. Pandey P.K. Fourth Order Finite Difference Method for Sixth Order Boundary Value Problems. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 57-62. <https://doi.org/10.1134/S0965542513010107>
7. Viswanadham K.N.S.K., Ballem S. Numerical solution of eighth order boundary value problems by Galerkin method with quintic B-splines. *International Journal of Computer Applications*, 2014, vol. 89, no. 15, pp. 7-13. DOI: 10.5120/15705-4562
8. Shleenko A.V., Volkova S.N. Analiz innovatsionnoi deyatel'nosti stroitel'noi organizatsii [Analysis of innovative activity of the construction organization]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2011, no. 5-2(38), pp. 363-367 (In Russ.).
9. Reddy S.M. Numerical solution of eighth order boundary value problems by Petrov-Galerkin method with quintic B-splines as basic functions and septic B-splines as weight functions. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2016, vol. 5, no. 09, pp. 17894-1790. Available at: <http://ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/2439/2254>
10. Jiang Z. W. A meshfree method for numerical solution of nonhomogeneous time dependent problems, *Abstract Appl. Anal.*, Article ID 978310, 2014.
11. Voloshinov D.V. Constructive geometric modeling. Theory, practice, automation. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2010. 355 p.
12. Vabishchevich P. N., Vasil'ev V. I., Vasil'eva M. V. Computational identification of the right hand side of a parabolic equation. *Comput. Math. Math. Phys.*, 2015, 55, no. 9, pp. 1015-1021.
13. Kenneth S. Schmitz Chapter 1: Philosophy of Science. *Physical Chemistry*, 2018, pp.183-367.
14. Philip L. Marston Geometrical and Catastrophe Optics Methods in Scattering. *Physical Acoustics*, 1992, vol. 21, pp. 1-234.
15. Kenneth S. Schmitz Chapter 1: Philosophy of Science. *Physical Chemistry*, 2018, pp.183-367.

Информация об авторах / Information about the Authors

Волкова Светлана Николаевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: volkova_47@mail.ru

Svetlana N. Volkova, Dr. of Sci. (Agricultural), Professor, Kursk State Agricultural Academy, Kursk, Russian Federation, e-mail: volkova_47@mail.ru

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

Aleksey V. Shleenko, Cand. of Sci. (Economic), Associate Professor, Department of Expertise and Real Estate Management, Mining, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shleenko77@mail.ru

Морозова Виктория Викторовна, кандидат педагогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: viktoriy1975@rambler.ru

Victoria V. Morozova, Cand. of Sci. (Pedagogical), Associate Professor, Kursk State Agricultural Academy, Kursk, Russian Federation, e-mail: viktoriy1975@rambler.ru

Сивак Елена Евгеньевна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: elenasivak77@mail.ru

Elena E. Sivak, Dr. of Sci. (Agricultural), Professor, Kursk State Agricultural Academy, Kursk, Russian Federation, e-mail: elenasivak77@mail.ru

Метод и алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара

И.Е. Чернецкая¹, С.В. Спевачева¹ ✉, Д.В. Применко¹

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

✉ e-mail: sspev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В современных автоматических системах сбора информации все чаще используются автономные мобильные устройства, данные с которых могут быть получены в опасных для здоровья человека условиях с территориально удаленных мест, в сложной метеорологической обстановке, в режиме круглосуточного наблюдения. Для автономной работы подобных устройств необходимо использовать методы и алгоритмы, позволяющие строить карту местности, осуществлять привязку мобильной платформы на ней, определять маршрут к целевой точке, выделять препятствия на маршруте следования, производить корректировку маршрута с учетом обнаруженных препятствий.

Методы. В статье предложен метод и алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы, основанный на анализе данных, полученных от мультиспектральной камеры, что позволяет осуществлять выделение препятствий, таких, как водные, растительного происхождения, техногенного характера и т.д. со снижением вычислительной сложности. Для повышения точности определения координат обнаруженных объектов используется лазерный дальномер.

Результаты. Рассмотрены известные методы распознавания мультиспектральных изображений, приведен их сравнительный анализ. Предложен метод и алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара. Проведены экспериментальные исследования, позволяющие подтвердить адекватность математического обоснования метода, снизить погрешность вычисления координат объекта, на удалении до 100 метров до объекта, RMSE - 0,447%, MAPE - 0,397, повысить быстродействие, на выделение объекта и определение его координат было затрачено 0,04 секунды.

Заключение. В статье проведен анализ современных методов распознавания мультиспектральных изображений, представлены принципы, на которых основан каждый метод, приведены достоинства и недостатки. Разработан метод и алгоритм, позволяющие выделять статические и динамические препятствия на маршруте следования подвижной платформы, по последовательности изображений, полученных в разных спектральных диапазонах. В ходе экспериментальных исследований, подтверждены работоспособность предложенных решений и соответствие заданным требованиям точности и достоверности.

Ключевые слова: алгоритм; метод; мультиспектральный; подвижная платформа; анализ изображений; динамические объекты.

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

Для цитирования: Черneckая И.Е., Спевакoва С.В., Применко Д.В Метод и алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 121-136. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-121-136>.

Поступила в редакцию 27.04.2020

Подписана в печать 08.06.2020

Опубликована 30.06.2020

Method and Algorithm for Recognition Dynamic Objects from a Mobile Platform, from Images Obtained in Different Spectral Ranges and Lidar Data

Irina E. Cherneckaya¹, Svetlana V. Spevakova¹ ✉, Dmitry V. Primenko¹

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

✉ e-mail: sspev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. In modern automatic information collection systems, autonomous mobile devices are increasingly used, data from which can be obtained in conditions hazardous to human health, from geographically remote places, in difficult meteorological conditions and in round-the-clock observation mode. For the autonomous operation of such devices, it is necessary to use methods and algorithms that allow you to build a map of the area, link a mobile platform to it, determine a route to a target point, highlight obstacles along the route and correct the route taking into account detected obstacles.

Methods. The article proposes a method and an algorithm for the selection of dynamic objects from a mobile platform, based on the analysis of data obtained from a multispectral camera, which allows the selection of obstacles, such as water, plant origin, technogenic nature, etc. with reduced computational complexity. To improve the accuracy of determining the coordinates of detected objects, a laser rangefinder is used.

Results. We consider the well-known methods of multispectral images recognition and present their comparative analysis. A method and an algorithm for recognition dynamic objects from a mobile platform, from images obtained in different spectral ranges and lidar data are proposed. Experimental studies were carried out to confirm the adequacy of the mathematical substantiation of the method, to reduce the error in calculating the coordinates of the object, at a distance of up to 100 meters to the object, RMSE - 0.447%, MAPE - 0.397, to increase the performance, it took 0, 04 seconds to select the object and determine its coordinates.

Conclusion. The article analyzes modern methods for recognizing multispectral images, presents the principles on which each method is based, gives advantages and disadvantages. The authors have developed a method and an algorithm that make it possible to identify static and dynamic obstacles along the route of a mobile platform, based on a sequence of images obtained in different spectral ranges. In the course of experimental studies, the performance of the proposed solutions and compliance with the specified requirements for accuracy and reliability were confirmed.

Keywords: algorithm; method; multispectral; movable platform; image analysis; dynamic objects.

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

For citation: Cherneckaya I. E., Spevakova S. V., Primenko D. V. Method and Algorithm for Recognition Dynamic Objects from a Mobile Platform, from Images Obtained in Different Spectral Ranges and Lidar Data // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 121-136 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-121-136>.

Received 27.04.2020

Accepted 08.06.2020

Published 30.06.2020

Введение

Особое место в использовании оптико-электронных устройств (ОЭУ) занимает задача построения маршрута и управления ориентацией автономной мобильной платформой (АМП) в постоянно меняющихся условиях наблюдения [1]. Так как в процессе движения, во входных данных устройства управления АМП присутствует неопределенность за счет расположения окружающих объектов как динамических, так и стационарных, сложности ландшафта, погодных явлений. Такие устройства должны обеспечивать функционирование в автоматическом режиме без постоянного присутствия человека [2].

Одной из задач является построение устройства управления автономной мобильной платформой для экологического мониторинга [3]. Такие платформы могут применяться в условиях, опасных для здоровья человека, как при анализе радиационной, химической, бактериологической загрязненности, так и при круглосуточном мониторинге территориально удаленных мест. Но функционирование данных устройств подразумевает использование их на не подготовленных заранее территориях, со сложным ландшафтом, наличием преград, как времен-

ных, так и постоянных. Точки сбора материалов для анализов могут быть не обеспечены подъездными путями с наличием разметки [4].

Объектом исследования является модель выделения движущихся в пространстве объектов с подвижной системой технического зрения, по последовательности изображений, полученных в различных спектральных диапазонах.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы выделения объектов, движущихся в пространстве.

Целью работы является анализ современных методов выделения движущихся в пространстве объектов и создание метода и алгоритма, позволяющего вести наблюдение с подвижной системы технического зрения, являющейся адаптивной к изменяющимся условиям наблюдения.

Постановка задачи

Обработка данных в современных ОЭУ основывается на информации, полученной от оптико-электронного датчика, методах и алгоритмах анализа изображения, критериях оценки качества функционирования устройства и обусловлена, обычно, наблюдением в заданном спектральном диапазоне длин

волн от ультрафиолетового до инфракрасного, что не всегда позволяет обеспечить необходимое качество для решения задач распознавания сложных, многокомпонентных изображений. Поэтому для повышения качества распознавания объектов изображения и возможности работы устройства при различных внешних помехах необходимо применять мультиспектральные датчики, позволяющие получать изображения в нескольких спектральных диапазонах.

В связи с вышеизложенным, актуальной научно-технической задачей является разработка метода и алгоритма выделения динамических объектов с подвижной платформы, из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара.

Решению задачи построения карты маршрута мобильного робота с одновременной локализацией посвящены работы ученых Д.А. Барамия, С.В. Манько, W. Hess, В.Е. Павловский, Guolai Jiang и других.

Обычно анализ мультиспектральных изображений включает в себя: фильтрацию, сегментацию и распознавание. Процесс выделения динамических объектов с подвижной платформы сопряжен с процессом их распознавания [5,6]. При решении современных задач построения карты пространства, структура которого заранее неизвестна, и одновременного определения позиции робота в нем (SLAM) все чаще используются комбинированные системы, использующие ла-

зерные дальномеры и оптико-электронные датчики. В отличие от лидарных SLAM и визуальных SLAM, комбинированные системы сложны в реализации, так как необходимо сопоставить полученную точку по нескольким каналам, визуальным и оценки дальности.

Большинство методов, существующих на сегодняшний день, используют одинаковый подход для решения задачи SLAM. Он основан на вероятностном методе, который базируется на теореме Байеса, обычно в этом случае выполняется оценка положения робота, с помощью цикла предсказаний и коррекции. Этот цикл заключается в том, что по некоторым данным внутренних сенсоров мы делаем предположение о новой позиции робота, а затем уточняем с помощью некоторых внешних измерений.

Все множество SLAM алгоритмов можно разделить на классы по типу входных данных:

- 1) лазерный сканер и одометрия, LiDAR-SLAM;
- 2) камера и одометрия, Visual-SLAM;
- 3) стереокамера или RGB-D камера;
- 4) сенсор магнитного поля.

Так, например, достаточно распространены SLAM методы, которые используют в качестве входных данных одометрию и данные лидаров, чаще всего эти методы, основанные на фильтре частиц (FastSLAM, DP-SLAM, HectoSLAM, GMapping). Кроме этого, существуют методы, которые используют для построе-

ния карты оптико-электронные датчики (ОЭД), как монокулярные, так и стерео или RGB-D. Такие SLAM алгоритмы называются VisualSLAM или vSLAM. Кроме этого бывают SLAM алгоритмы, которые используют такие сенсоры, как сенсор магнитного поля, но их очень мало, но тем не менее, они существуют и применяются на практике.

Визуальные SLAM были построены на методе Mono-SLAM [7], основанном на расширенном фильтре Калмана, который оценивает вектор состояния динамической системы, используя серию неполных и зашумленных измерений.

Несмотря на все свои преимущества, Mono-SLAM имеет ограничения на количество используемых ориентиров в системе. Связанно это с тем, что при появлении новых элементов в наблюдении они добавляются в вектор состояния. Таким образом, шум ковариационной матрицы растет квадратично, что приводит к увеличению времени обработки.

Методы, основанные на использовании RGB-D камер, используют информацию как о цвете, так и о глубине в своем поле зрения. Так известен метод Kinect fusion [8], который использует изображения глубины, и получает данные от датчика Kinect, для формирования глобальной неявной поверхностной модели наблюдаемой сцены в реальном времени, далее после измерения минимального расстояния каждого пикселя в каждом кадре и объединения

всех изображений глубины, формируется глобальная картографическая информация сцены.

Недостатком метода является небольшой размер анализируемой сцены наблюдения, в пределах двух метров, и накопление погрешности измерения.

В настоящее время наиболее часто используются системы с вспомогательными датчиками энкодерами и инерциальными измерительными блоками, которые могут предоставлять дополнительные данные о движении робота [9-10]. Наиболее перспективным решением, являются системы с использованием ОЭД, работающих в различных спектральных диапазонах. Для обработки поступающей от таких датчиков информации используются методы распознавания мультиспектральных изображений [11-13].

Так известен метод распознавания, основанный на морфологических преобразованиях. Сущность метода заключается в формировании некоего класса, определяющего морфологические признаки, относящиеся к объекту, и не зависящего от условий, в которых происходит инициализация мультиспектрального изображения.

На первом шаге формируется результирующая нулевая поверхность определенного размера. Далее входная информация об мультиспектральном изображении подвергается попиксельной обработке. В процессе анализа используются различные морфологические опе-

раторы, позволяющие проводить анализ изображения.

Работа рассмотренного выше метода основана на следующих этапах:

1. Формирование массива данных из исходного изображения.
2. Обработка массива путем перемещения окна свертки относительно входящего изображения.
3. Определение максимума и минимума интенсивности пикселя для каждого состояния.

Рассмотренный метод имеет следующие недостатки: выбор размера структурирующего элемента осуществляется путем перебора множества значений, что ведет к увеличению вычислительной сложности.

Одним из самых быстродействующих методов распознавания мультиспектральных изображений является метод распознавания по цвету [14-16]. Выделение объектов осуществляется по признакам, характеризующимся цветом в одном из пространств, что позволяет обеспечить высокую точность и достоверность поиска распознаваемого объекта. Недостатком данного метода является высокое снижение достоверности и точности распознавания при окраске объекта множеством цветов.

На основе анализа научных работ было выявлено, что работы представленных ученых недостаточно освещают использование информации от датчиков, работающих в различных спектральных диапазонах, при проектиро-

вании устройств управления автономными мобильными платформами. Что позволило сформулировать основные задачи и цель работы.

Анализ современных методов и алгоритмов обработки мультиспектральных изображений показал наличие целого ряда ограничений при использовании их для анализа движущихся и пересекающихся объектов. Исходя из этого необходимо разработать универсальный метод и алгоритм для выделения динамических объектов с подвижной платформы из изображений, полученных в различных спектральных диапазонах.

Материалы и методы

Предложенный метод выделения динамических объектов с подвижной платформы, из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара, включает: фильтрацию изображений от случайных и систематических помех, формирование мультиспектрального изображения, объединенного из нескольких, полученных в разных спектральных зонах, выделение пространственных объектов за счет разностных характеристик спектральных изображений, корректировку оценки дальности обнаруженных объектов с учетом данных, полученных от лидара, вычисление трехмерных координат объектов сцены с учетом перемещения подвижной платформы, уточнения собственного положения и динамической

калибровки мультиспектрального оптико-электронного устройства.

Отличительной новизной метода является:

- обработка изображений, полученных в разных спектральных диапазонах, что позволяет выделить объекты сцены с минимальным количеством вычислительных ресурсов;

- вычисление трехмерных координат геометрических центров и размеров выделенных объектов с использованием данных от лидара, что позволяет повысить точность вычислений для объектов, находящихся на различном удалении от мобильного оптико-электронного устройства (МОЭУ);

- введение функции первоначальной калибровки, по эталонному объекту с источниками излучения, работающих в различных спектральных диапазонах от ультрафиолетового до инфракрасного, что позволяет снизить погрешности измерений трехмерных координат объектов;

- использование при локализации данных мультиспектрального датчика и лидара позволяет снизить значение накопленной ошибки за весь маршрут следования.

Алгоритм выделения пространственных объектов и вычисления трехмерных координат их геометрического центра и размеров (рис.1) заключается в выполнении следующих операций: ввод

и предобработка данных от мультиспектральных оптико-электронных датчиков (блоки 1 – 2), формирование мультиспектрального изображения (блок 3), блок-схема данного блока подробно представлена на рис. 2, выделения объектов изображения (блок 6), вычисление трехмерных координат выделенных объектов (блоки 7 – 9), выполнения калибровки МОЭУ (блоки 10 – 15).

Алгоритм управления подвижной платформой позволяет повысить точность пространственной привязки, в условиях динамически меняющейся обстановки, за счет корректировки исходного маршрута, сформированного с помощью систем позиционирования, с учетом обнаруженных препятствий.

Новизна предложенных алгоритмов заключается в формировании предварительно сжатого, квантованного, мультиспектрального изображения из последовательности изображений, полученных от мультиспектрального оптико-электронного датчика, что позволяет снизить вычислительные затраты при выделении объектов сцены, в повышении точности расчета трехмерных координат геометрических центров объектов и их размеров за счет корректировки оценки дальности, в повышении точности пространственной привязки подвижной платформы и корректировки исходного маршрута, с учетом обнаруженных препятствий.

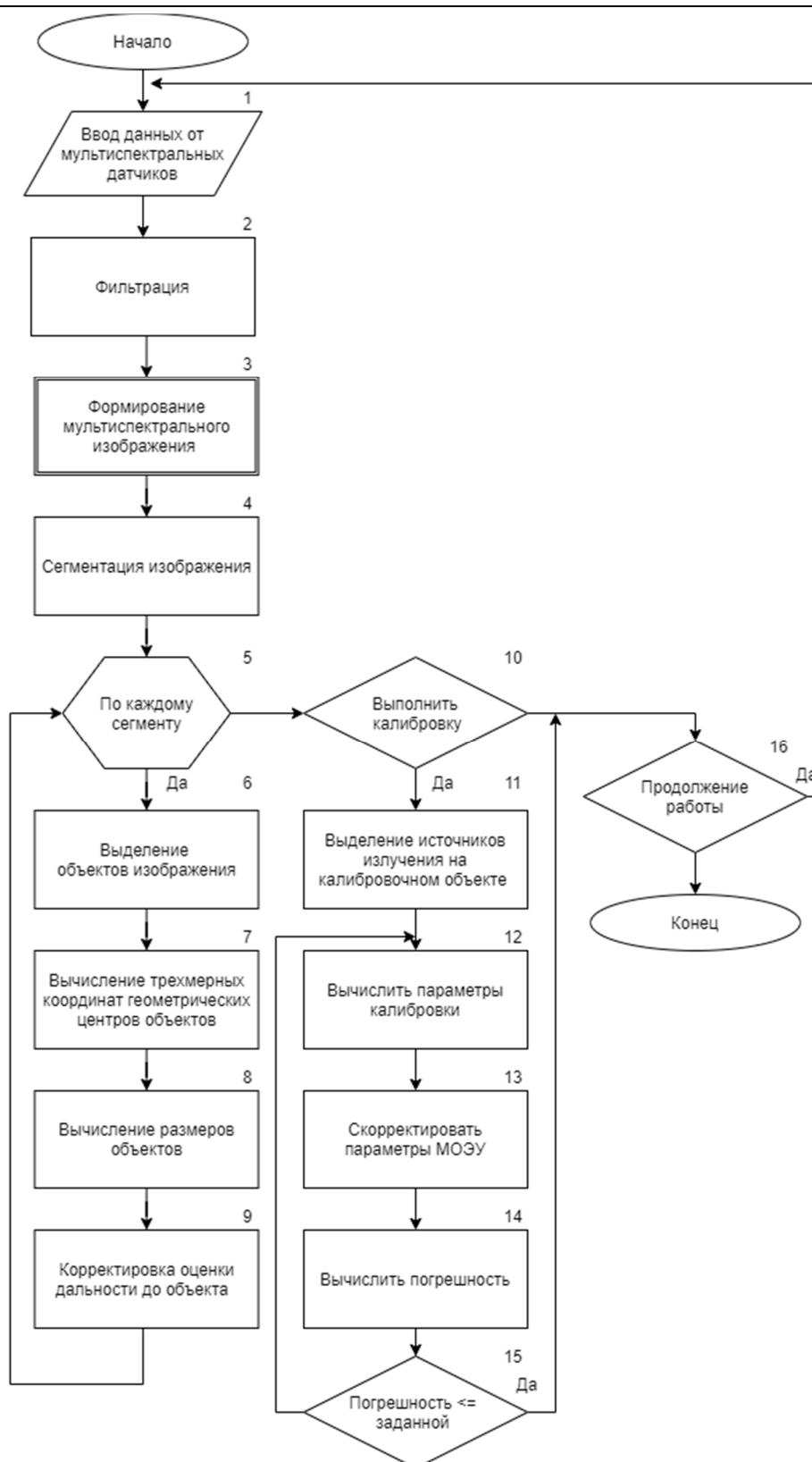


Рис. 1. Алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара

Fig. 1. Algorithm for recognition dynamic objects from a mobile platform, from images obtained in different spectral ranges and lidar data



Рис.2. Алгоритм формирования мультиспектрального изображения

Fig. 2. Algorithm for forming a multispectral image

Результаты и их обсуждение

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели был разработан программный модуль, в соответствии с предложенными алгоритмами, представленными на рис. 1-2. Входные данные для программного модуля были получены с подвижной платформы, оснащенной мультиспектральной камерой и лидаром [17]. В ходе эксперимента было смоделировано движение объекта на удалении от 10 до 100 метров от подвижной платформы наблюдения. При этом движение объектов было прямолинейным и равномерным, с априори известным местоположением эталонных объектов. Траектории движения платформы и наблюдаемого объекта пересекались под определенным углом, угол в рамках одного экспери-

мента был постоянен. Данные от мультиспектральной камеры и лидара передавались в персональную ЭВМ, синхронизировались и в виде последовательностей кадров поступали в программный модуль для дальнейшего анализа [18,19].

Данные, полученные в ходе эксперимента, о количестве выделенных объектов, их трехмерных координатах, координатах уточненного маршрута использовались для сравнительного анализа с известной моделью 2.5D map with LiDAR and Camera [10], оценки погрешности вычислений и представлены в табл. 1.

На рис. 3, 4 представлены экспериментальные и расчетные зависимости характеристик разработанного устройства.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Table 1. The results of experimental studies

Параметр / Parameter	2.5D map with LiDAR and Camera	Предложенный метод / Proposed method
Среднеквадратическое отклонение позиционирования RMSE (%): – дальность до 10 м; – дальность 100 м	0,187 0,521	0,328 0,447
Средняя абсолютная ошибка позиционирования MAPE (%): – дальность до 10 м; – дальность 100 м	0,169 0,467	0,289 0,397
Достоверность выделения динамического объекта на удалении до 100 м: – один объект; – несколько объектов; – один объект с помехой; – несколько объектов с помехой	0,95 0,95 - -	0,98 0,95 0,95 0,80
Время обнаружения объекта и вычисления его координат, с	6,6	0,04

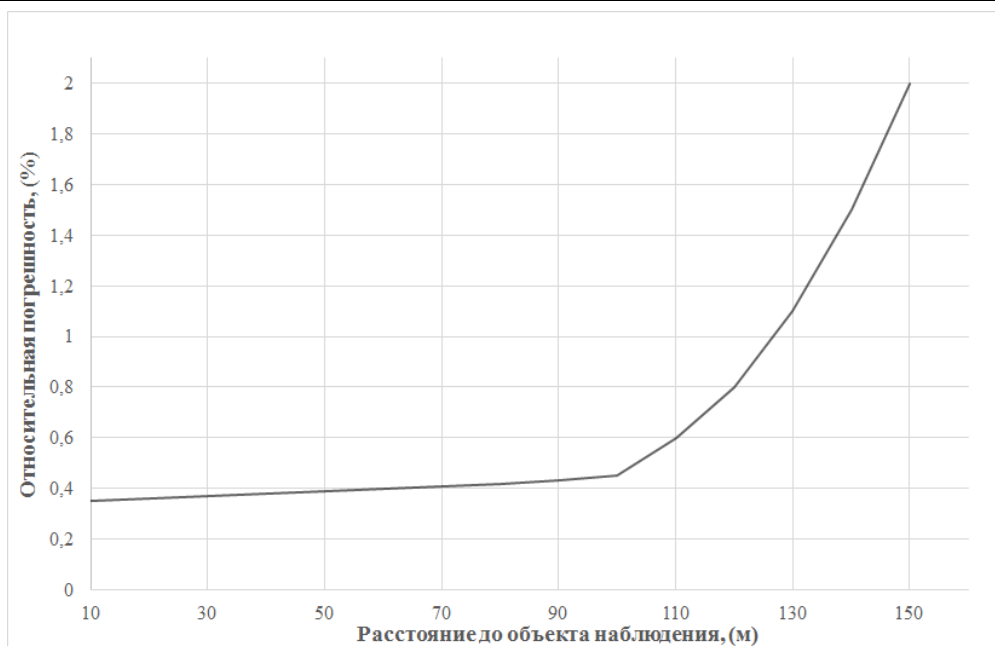


Рис. 3. График относительной погрешности вычисления координат объектов

Fig. 3. Graph of relative error in calculating the coordinates of objects

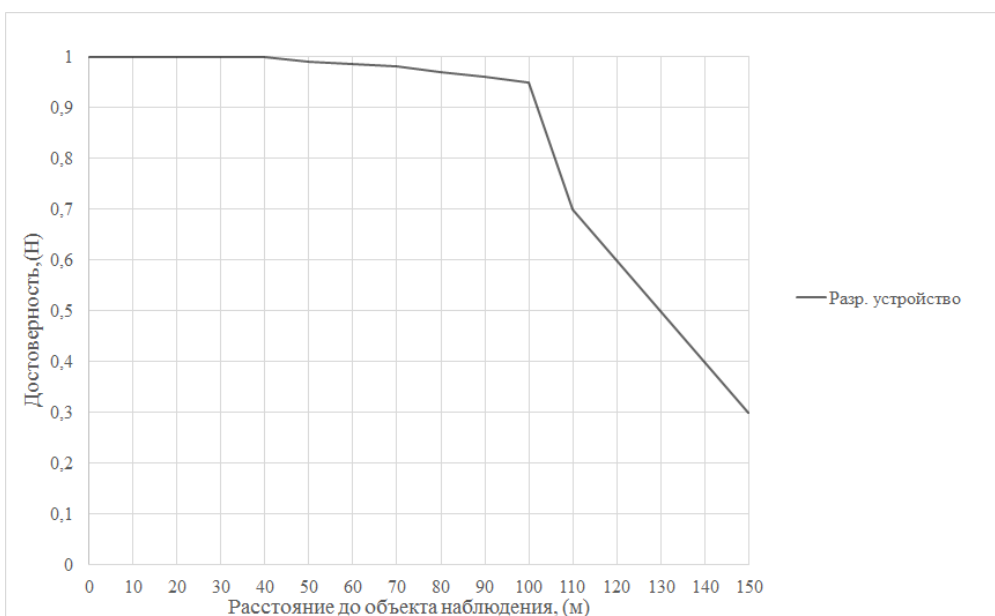


Рис. 4. График зависимости достоверности выделения объектов от расстояния

Fig. 4. Graph of the dependence of the accuracy of object selection on distance

В ходе эксперимента проведены исследования предложенного метода и алгоритма, в различных условиях и на разном удалении выделяемого объекта от подвижной платформы с системой

технического зрения. Полученные данные позволяют оценить соответствие погрешности определения координат наблюдаемого объекта расчетным и экспериментальным путем. Анализ резуль-

татов экспериментальных исследований и математического моделирования подтвердил адекватность разработанных метода и алгоритма и определяет трехмерные координаты объектов с погрешностью, на удалении до 10 м – 0,35 %, на удалении 100 м - 0,45%. Достоверность выделенного объекта, на расстоянии до 100 м включительно, находится в пределах 0,95, на удалении свыше 100 метров достоверность снижается, это обусловлено дальностью действия лидара. При сравнении с аналогичным решением [3], можно сделать вывод, что на удалении до 100 метров, предложенный метод имеет на 16% ниже среднюю абсолютную погрешность позиционирования, по сравнению с аналогичным способом. За счет использования мультиспектральных оптико-электронных датчиков временные затраты на обнаружение объекта и вычисления его координат значительно снизились, предложенный метод затратил 0,04 секунды, прямому аналогу понадобилось 6,6 секунды.

Выводы

Предложенный метод и алгоритм позволяет определить координаты ди-

намических объектов с подвижных оснований систем технического зрения.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что предложен метод и алгоритм выделения динамических объектов с подвижной платформы, из изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и данных лидара, позволяющий автоматически выделять движущиеся объекты, определять их трёхмерные координаты с заданной точностью, адаптироваться к изменяющимся условиям наблюдения.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что в ходе экспериментальных исследований подтверждена адекватность предложенного метода и алгоритма. Результаты эксперимента позволяют рекомендовать предложенный метод для построения мобильных автоматических систем слежения и идентификации объектов.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в изучении возможности реализации данного метода на программно-аппаратном комплексе, позволяющем повысить точность выделения объектов.

Список литературы

1. Хафизов Р. Г., Охотников С. А. Распознавание непрерывных комплекснозначных контуров изображений // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. №. 5.
2. Дегтярев С.В., Спесваков А.Г., Типикин А.П. Определение координат движущихся объектов стереоскопической системой технического зрения // Телекоммуникации. 2004. № 8. С. 35 -36.

3. Шибакина Т. А., Спесов А. Г. Стереоскопическая оптико-электронная система определения параметров динамических объектов в реальном времени // Датчики и системы. 2004. № 6. С. 65-67.
4. Спесова С. В. Построение маршрута мобильного робота на основе анализа мультиспектральных данных // Интеллектуальные и информационные системы. Интеллект-2019. Тула, 2019. С. 334-337.
5. Спесов А. Г., Рубанов А. Ф. Стереоскопическая оптико-электронная система слежения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 2. С. 62-67.
6. Спесов А. Г. Метод выделения движущихся объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 1. С. 233-237.
7. Davison A. J. et al. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2007. Т. 29. № 6. P. 1052-1067.
8. Newcombe R. A. et al. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking // 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. IEEE, 2011. P. 127-136.
9. Kerl C., Sturm J., Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, 14–18 September 2014. P. 2100–2106.
10. Jiang G. et al. A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5 D map building based on low-cost LiDAR and vision fusion // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 10. P. 2105.
11. Антюфеев В. И., Быков В. Н. Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 1. С. 70-78.
12. Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. Спектрональные методы и системы в космическом телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия техника телевидения. 2009. Вып. 1. С. 47–64.
13. Бондаренко М. А., Дрынкин В. Н. Оценка информативности комбинированных изображений в мультиспектральных системах технического зрения // Программные системы и вычислительные методы. 2016. № 1. С. 64-79.
14. Krishnamoorthy S., Soman K. P. Implementation and comparative study of image fusion algorithms // International Journal of Computer Applications. 2010. Vol. 9. № 2. P. 25-35.
15. Калущий И.В., Матюшин Ю.С., Спесова С.В. Анализ современных статических методов биометрической идентификации // Известия Юго-Западного государ-

ственного университета. 2019. Т. 23, № 1. С. 84-94. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-1-84-94](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-84-94).

16. Бехтин Ю. С., Емельянов С. Г., Титов Д. В. Теоретические основы цифровой обработки изображений встраиваемых оптико-электронных систем. Курск, 2016.

17. Пат. 2714603 Российская Федерация. Подвижное стереоскопическое устройство выделения динамических объектов / Спесвакова С.В., Калущкий И.В.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет». №2018147106; опубл. 18.02.2020, Бюл. №5.

18. Spevakova S. V., Matiushin I. S., Spevakov A. G. Detecting objects moving in space from a mobile vision system // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 4. P. 103-110.

19. Kalutskiy I., Spevakova S., Matiushin I. Method of Moving Object Detection from Mobile Vision System // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2019. P. 1-5.

References

1. Hafizov R. G., Okhotnikov S. A. Raspoznavanie nepreryvnykh kompleksnoznachnykh konturov izobrazhenii [Recognition of continuous complex-valued image contours]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Priborostroenie*, 2012, vol. 55, no. 5 (In Russ.).

2. Degtyarev S. V., Spevakov A. G., Tipikin A. P. Opredelenie koordinat dvizhushchikhsya ob"ektov stereoskopicheskoi sistemoi tekhnicheskogo zreniya [Determination of coordinates of moving objects by the stereoscopic system of technical vision]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2004, no. 8, pp. 35 -36 (In Russ.).

3. Shirabakina T. A., Spevakov A. G. Stereoskopicheskaya optiko-elektronnaya sistema opredeleniya parametrov dinamicheskikh ob"ektov v real'nom vremeni [Stereoscopic optical-electronic system for determining parameters of dynamic objects in real time]. *Datchiki i sistemy = Sensors and Systems*, 2004, no. 6, pp. 65-67 (In Russ.).

4. Spevakova S. V. [The route of a mobile robot based on the analysis of multispectral data, in the collection: intelligent and information systems]. *Intellektual'nye i informatsionnye sistemy. Intellekt-2019* [Intellect-2019 Proceedings of the all-Russian scientific and technical conference]. Tula, 2019, pp. 334-337 (In Russ.).

5. Spevakov A. G., Rubanov A. F. Stereoskopicheskaya optiko-elektronnaya sistema slezheniya [Stereoscopic optical-electronic tracking system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = News of Higher Educational Institutions. Priborostroenie*, 2005, vol. 48, no. 2, pp. 62-67 (In Russ.).

6. Spevakov A. G. Metod vydeleniya dvizhushchikhsya ob"ektov [Method of selection of moving objects]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 1, pp. 233-237 (In Russ.).
7. Davison A. J. et al. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2007, vol. 29, no. 6, pp. 1052-1067.
8. Newcombe R. A. et al. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. *10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE*, 2011, pp. 127-136.
9. Kerl C., Sturm J., Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IL, USA, 14–18 September 2014, pp. 2100–2106.
10. Jiang G. et al. A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5 D map building based on low-cost LiDAR and vision fusion. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 10, pp. 2105.
11. Antyufeev V. I., Bykov V. N. Sravnitel'nyi analiz algoritmov sovmeshcheniya izobrazhenii v korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistemakh navigatsii letatel'nykh apparatov [Comparative analysis of image matching algorithms in correlation-extreme navigation systems of aircraft]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya = Aviation and Space Technology and Technology*, 2008, no. 1, pp. 70-78 (In Russ.).
12. Zubarev I. B., Sagdullaev I. S., Sagdullaev T. I. Spektrozonol'nye metody i sistemy v kosmicheskom televidenii [Spectrosonal methods and systems in space television]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. TV Technique Series*, 2009, is. 1, pp. 47-64 (In Russ.).
13. Bondarenko M. A., Drinkin V. N. Otsenka informativnosti kombinirovannykh izobrazhenii v mul'tispektral'nykh sistemakh tekhnicheskogo zreniya [Evaluation of the information content of combined images in multispectral systems of technical vision]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody = Software Systems and Computational Methods*, 2016, no. 1, pp. 64-79 (In Russ.).
14. Krishnamoorthy S., Soman K. P. Implementation and comparative study of image fusion algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 2010, vol. 9, no. 2, pp. 25-35 (In Russ.).
15. Kaluutsky I. V., Matyushin Yu. S., Spevakova S. V. Analysis of Modern Static Methods of Biometric Identification. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23 (1): pp. 84-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-84-94>.

16. Bekhtin Yu. S., Emelyanov S. G., Titov D. V. *Teoreticheskie osnovy tsifrovoi obrabotki izobrazhenii vstraivaemykh optiko-elektronnykh sistem* [Theoretical bases of digital image processing of embedded optical-electronic systems]. Kursk, 2016 (In Russ.).

17. Spevakova S. V., Kalutsky I. V. *Podvizhnoe stereoskopicheskoe ustroystvo vydeleniya dinamicheskikh ob"ektov* [Mobile stereoscopic device for selecting dynamic objects]. Patent RF, no. 2018147106, 23.01.2020. (In Russ.).

18. Spevakova S. V., Matiushin I. S., Spevakov A. G. Detecting objects moving in space from a mobile vision system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, no. 4, pp. 103-110.

19. Kalutskiy I., Spevakova S., Matiushin I. Method of Moving Object Detection from Mobile Vision System. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.

Информация об авторах / Information about the Authors

Чернецкая Ирина Евгеньевна, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: white731@yandex.ru

Irina E. Cherneckaya, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: white731@yandex.ru

Спевакова Светлана Викторовна, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sspev@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1271-1275>

Svetlana V. Spevakova, Post-Graduate Student of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sspev@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1271-1275>

Применко Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dima-primenko777@yandex.ru

Dmitry V. Primenko, Post-Graduate Student, of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dima-primenko777@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-137-151>

Бифуркационный анализ кусочно-гладких бимодальных отображений с помощью нормальной формы

Ж. Т. Жусубалиев¹, Д. С. Кузьмина¹, О. О. Яночкина¹ ✉

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

✉ e-mail: yanoolga@gmail.com

Резюме

Цель работы. Исследование бифуркаций в бимодальных кусочно-гладких отображениях с использованием кусочно-линейного непрерывного отображения в качестве нормальной формы.

Методы. Мы предлагаем методику определения параметров нормальной формы на базе линеаризации кусочно-гладкого отображения в окрестности критической неподвижной точки.

Результаты. На плоскости параметров численно и аналитически построена область устойчивости неподвижной точки. Показано, что эта область ограничена двумя бифуркационными кривыми: линиями классической бифуркации удвоения периода и «border collision» бифуркации. Предложена методика определения параметров нормальной формы как функции параметров кусочно-гладкого отображения. Проведен анализ «border-collision» бифуркаций с использованием кусочно-линейной нормальной формы.

Заключение. Выполнен бифуркационный анализ кусочно-гладкого необратимого бимодального отображения класса $Z_1-Z_3-Z_1$, моделирующего динамику системы управления с импульсной модуляцией. Предложена методика расчёта параметров кусочно-линейного непрерывного отображения, используемого в качестве нормальной формы. Рассчитаны основные бифуркационные переходы при выходе из области устойчивости как с использованием исходного отображения, так и с помощью кусочно-линейной нормальной формы. Численно доказана топологическая эквивалентность этих отображений, указывающая на достоверность результатов расчёта параметров нормальной формы.

Ключевые слова: кусочно-гладкое бимодальное отображение класса $Z_1-Z_3-Z_1$; нормальная форма; кусочно-линейное непрерывное отображение; «border collision» бифуркации.

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

Для цитирования: Жусубалиев Ж. Т., Кузьмина Д. С., Яночкина О. О. Бифуркационный анализ кусочно-гладких бимодальных отображений с помощью нормальной формы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 137-151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-137-151>.

Поступила в редакцию 12.05.2020

Подписана в печать 28.05.2020

Опубликована 30.06.2020

Bifurcation Analysis of Piecewise Smooth Bimodal Maps Using Normal Form

Zhanybai T. Zhusubaliyev¹, Daria S. Kuzmina¹, Olga O. Yanochkina¹ ✉

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

✉ e-mail: yanoolga@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Study of bifurcations in piecewise-smooth bimodal maps using a piecewise-linear continuous map as a normal form.

Methods. We propose a technique for determining the parameters of a normal form based on the linearization of a piecewise-smooth map in a neighborhood of a critical fixed point.

Results. The stability region of a fixed point is constructed numerically and analytically on the parameter plane. It is shown that this region is limited by two bifurcation curves: the lines of the classical period-doubling bifurcation and the "border collision" bifurcation. It is proposed a method for determining the parameters of a normal form as a function of the parameters of a piecewise smooth map. The analysis of "border-collision" bifurcations using piecewise-linear normal form is carried out.

Conclusion. A bifurcation analysis of a piecewise-smooth irreversible bimodal map of the class $Z_1-Z_3-Z_1$ modeling the dynamics of a pulse-modulated control system is carried out. It is proposed a technique for calculating the parameters of a piecewise linear continuous map used as a normal form. The main bifurcation transitions are calculated when leaving the stability region, both using the initial map and a piecewise linear normal form. The topological equivalence of these maps is numerically proved, indicating the reliability of the results of calculating the parameters of the normal form.

Keywords: piecewise smooth bimodal map of class $Z_1-Z_3-Z_1$; normal form; piecewise linear continuous map; "border collision" bifurcation.

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

For citation: Zhusubaliyev Zh. T., Kuzmina D. S., Yanochkina O. O. Bifurcation Analysis of Piecewise Smooth Bimodal Maps Using Normal Form // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 137-151 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-137-151>.

Received 12.05.2020

Accepted 28.05.2020

Published 30.06.2020

Введение

Многие задачи из механики, физики, силовой электроники, теории управления, экономики и биологии приводят к исследованию одномерных необрати-

мых кусочно-гладких бимодальных отображений (рис. 1) [1–6]:

$$x \mapsto F(x),$$

$$F(x) = \begin{cases} F_L(x), & x \leq c_L; \\ F_M(x), & c_L < x < c_R; \\ F_R(x), & x \geq c_R. \end{cases}$$

Здесь $F_L(x)$, $F_M(x)$, $F_R(x)$ – гладкие функции класса C^r , $r \geq 1$. Напомним, что такие отображения имеют два локальных экстремума в точках недифференцируемости – максимум c_L и минимум c_R (рис. 1), которые являются границами («borders») областей определения $F_L(x)$, $F_M(x)$ и $F_R(x)$ [1-6] и называются точками совпадающих прообразов ранга один [6] или многообразиями переключения («switching manifold») [6, 7]. В точках $x = c_L$ и $x = c_R$ функция $F(x)$ недифференцируема.

Локальные экстремумы отображаются в критические точки $c_0 = F_L(c_L)$, $c_1 = F_R(c_R)$, являющиеся образами ранга один точек c_L и c_R , соответственно. Точки c_0, c_1 делят фазовое пространство (фазовую прямую $x \in \mathbb{R}$) на три открытые области $Z_1 = \{x : x < c_1\}$, $Z'_1 = \{x : x > c_0\}$ и $Z_3 = \{x : c_1 < x < c_0\}$, такие, что каждая точка $x \in Z_1$ и $x \in Z'_1$ имеет только один

прообраз ранга один, а точки $x \in Z_3$ — три прообраза ранга один [6, 7].

В кусочно-гладких отображениях возможны разные типы неподвижных точек. Очевидно, что неподвижная точка конкретного типа, удовлетворяющая уравнению

$$F(x) - x = 0,$$

существует только в области определения соответствующей функции.

При вариации параметров, неподвижная точка попадает на одну из границ c_L или c_R , разделяющей области определения функций $F_L(x)$, $F_M(x)$ или $F_M(x)$, $F_R(x)$ (рис. 1). Это приводит к специфическим изменениям топологической структуры фазового пространства из-за нарушения условия существования неподвижной точки [8, 9]. Подобные топологические перестройки фазового пространства названы Nusse Н. Е. и Yorke J. А. «border collision» бифуркациями [10-12].

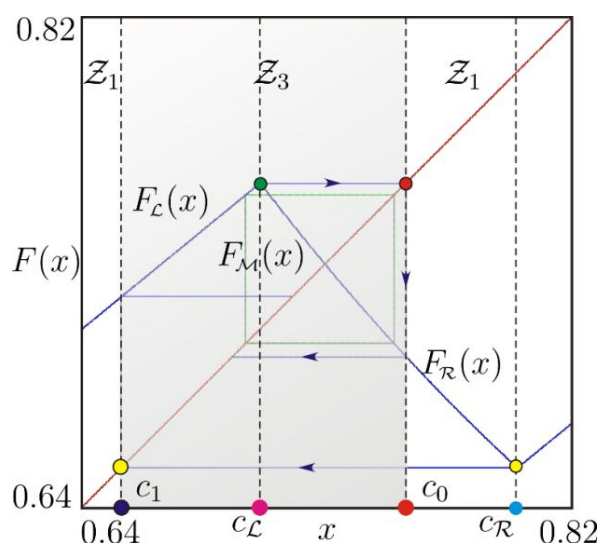


Рис. 1. Бимодальное кусочно-гладкое отображение

Fig. 1. Piecewise-smooth bimodal map

«Border collision» бифуркации могут приводить к чрезвычайно большому многообразию нелинейных явлений, например, к удвоению периода колебаний, одновременному возникновению нескольких сосуществующих аттракторов или рождению из неподвижной точки хаотического аттрактора [2, 3, 4, 6, 10-16].

В представленной работе исследуются бифуркационные явления в кусочно-гладких отображениях класса $Z_1-Z_3-Z_1$ [2, 7] в приложении к теории автоматического управления. Сначала мы рассчитываем область устойчивости неподвижных точек, а затем, изучаем

«border collision» бифуркации, связанные со столкновением инвариантных множеств, например, неподвижных точек с границами области их существования [2, 4, 6, 8-12]. Для этой цели мы используем кусочно-линейное непрерывное отображение в качестве нормальной формы [2, 6, 9, 17, 18]. Основная задача при таком подходе состоит в определении параметров нормальной формы в зависимости от параметров исходной модели [19].

Материалы и методы

Рассмотрим отображение $F: \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ вида

$$x \mapsto F(x),$$

$$F(x) = \begin{cases} F_L(x) = e^\lambda x, & x \geq \frac{q}{\Gamma}; \\ F_R(x) = e^\lambda (x-1) + 1, & x \leq \left(\frac{q}{\Gamma} - 1 + e^\lambda - \frac{P}{\Gamma\alpha} \right) e^{-\lambda}; \\ F_M(x) = e^\lambda (x-1) + e^{\lambda(1-z(x))}, & \left(\frac{q}{\Gamma} - 1 + e^\lambda - \frac{P}{\Gamma\alpha} \right) e^{-\lambda} < x < \frac{q}{\Gamma}. \end{cases} \quad (1)$$

Отображение (1) является дискретной моделью системы автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией [4, 20].

Здесь x – фазовая переменная; λ – коэффициент затухания; q , P – нормированные сигнал задания и амплитуда опорного сигнала широтно-импульсного модулятора; α – коэффициент усиления; Γ – параметр, связанный с параметрами источника энергии.

Функция $z(x)$, заданная неявно уравнением

$$\varphi(z, x) = \frac{q}{\Gamma} - 1 - (x-1)e^{\lambda z} - \frac{P}{\Gamma\alpha} z = 0, \quad (2)$$

определяет величину относительной длительности импульсов управления согласно модуляционной характеристике. Параметры модели: $P = 20$; $q = 40$; $\lambda = -0,2$; $\alpha > 0$, $\Gamma > 0$ – варьируемые параметры.

Одна из основных задач при проектировании импульсных систем автоматического управления состоит в расчёте области устойчивости рабочих режимов в пространстве параметров. Рабочим режимом рассматриваемого класса импульсных систем являются периодические колебания с периодом модуляции, которые отвечают неподвижной точке

отображения (1). При изменении параметров могут возникать субгармонические колебания или хаотические режимы в результате потери устойчивости или нарушения условия существования неподвижной точки.

Как показано в [4], область устойчивости неподвижной точки отображения (1) ограничена двумя бифуркационными кривыми: линией классической бифуркации удвоения периода и линией «border collision» бифуркации.

Для расчёта границы бифуркации удвоения периода воспользуемся алгоритмом, основанным на поиске периодических режимов методом уравнений периодов. Неподвижная точка отображения (1), отвечающая периодическому режиму с периодом модуляции, удовлетворяет уравнениям:

$$\begin{cases} \frac{q}{\Gamma} - 1 - (x-1)e^{\lambda z} - \frac{P}{\Gamma\alpha}z = 0; \\ e^{\lambda}(x-1) + e^{\lambda(1-z)} - x = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Первое уравнение этой системы – уравнение для коэффициента заполнения импульса z . Второе уравнение – это условие периодичности.

Переменную x в (3) можно исключить. Для этого из второго уравнения (3) выразим x и подставим в первое. В результате, получим трансцендентное уравнение относительно z :

$$\xi(z) = \frac{q}{\Gamma} - \frac{1-e^{\lambda z}}{1-e^{\lambda}} - \frac{P}{\Gamma\alpha}z = 0, \quad 0 \leq z \leq 1. \quad (4)$$

Уравнение (4) называется *уравнением периодов* для неподвижной точки [4, 17]. Пусть z_* — наименьший неотрица-

тельный корень (4). Тогда неподвижная точка x_* находится по формуле [17]

$$x_* = \frac{e^{\lambda(1-z_*)} - e^{\lambda}}{1 - e^{\lambda}}.$$

Локальная устойчивость x_* определяется неравенством

$$-1 < F'_{\mathcal{M}}(x_*) < 1,$$

где

$$F'_{\mathcal{M}}(x) = \frac{\partial F_{\mathcal{M}}(x)}{\partial x} + \frac{\partial F_{\mathcal{M}}(x)}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x}; \quad \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi(z, x) / \partial x}{\partial \varphi(z, x) / \partial z}.$$

Отсюда

$$F'_{\mathcal{M}}(x) = e^{\lambda} + \frac{\lambda e^{\lambda}}{\lambda e^{\lambda z}(x-1) + \frac{P}{\Gamma\alpha}}.$$

Производная $F'_{\mathcal{M}}(x_*)$ называется мультипликатором неподвижной точки. Граница бифуркации удвоения периода отвечает тем значениям параметров, при которых неподвижная точка x_* становится негиперболической с мультипликатором $F'_{\mathcal{M}}(x_*) = -1$. Это негрубое состояние (бифуркационное). Как известно, устойчивость негиперболической неподвижной точки с мультипликатором -1 определяется знаком производной Шварца:

$$SF_{\mathcal{M}}(x_*) = F'''_{\mathcal{M}}(x_*) - \frac{3}{2}[F''_{\mathcal{M}}(x_*)]^2.$$

Неподвижная точка асимптотически устойчива, если $SF_{\mathcal{M}}(x_*) < 0$, и неустойчива, если $SF_{\mathcal{M}}(x_*) > 0$. При переходе через бифуркационное значение параметра происходит удвоение периода колебаний, а неподвижная точка продолжает существовать, но становится неустойчивой.

В зависимости от знака производной Шварца различают два типа бифуркаций удвоения периода: суперкритическую, если $SF_{\mathcal{M}}(x_*) < 0$, и субкритическую, если $SF_{\mathcal{M}}(x_*) > 0$. Субкритическая называется ещё «опасной» или «жесткой», поскольку при переходе бифуркационного значения параметра происходит внезапная (жесткая) смена характера динамики.

Дополнив уравнение (4) условием нарушения гиперболичности неподвижной точки, связанного с обращением мультипликатора в -1 , получим

$$\begin{cases} \frac{q}{\Gamma} - \frac{1 - e^{\lambda z}}{1 - e^{\lambda}} - \frac{P}{\Gamma \alpha} z = 0; \\ e^{\lambda} + \lambda e^{\lambda} / \left(\lambda \cdot \frac{e^{\lambda} - e^{\lambda z}}{1 - e^{\lambda}} + \frac{P}{\Gamma \alpha} \right) = -1. \end{cases} \quad (5)$$

Граница классической бифуркации удвоения периода $\mathcal{L}_{FLIP}$ рассчитана численным решением системы (5). Линию бифуркации «border collision» можно получить аналитически из условия попадания неподвижной точки x_* на левую границу области определения $F_{\mathcal{M}}(x)$ [16]:

$$x_* = c_L = \left(\frac{q}{\Gamma} - 1 + e^{\lambda} - \frac{P}{\Gamma \alpha} \right) e^{-\lambda}.$$

Окрестность правой границы $F_{\mathcal{M}}(x)$ требует отдельного обсуждения. Это мы сделаем в заключительной части работы.

Прежде чем продолжить изложение, остановимся чуть подробнее на решении этой задачи следуя [17]. Из (4)

видно, что функция $\xi(z)$ монотонно убывающая. Отсюда, для существования решения уравнения (4) достаточно выполнения условия $\xi(0)\xi(1) < 0$, т.е.

$$\left(\frac{q}{\Gamma} - 1 - \frac{P}{\Gamma \alpha} \right) \cdot \frac{q}{\Gamma} < 0.$$

Так как $q/\Gamma > 0$, то это неравенство эквивалентно

$$\frac{q}{\Gamma} - 1 - \frac{P}{\Gamma \alpha} < 0.$$

Если

$$\frac{q}{\Gamma} - 1 - \frac{P}{\Gamma \alpha} > 0,$$

то уравнение (4) не имеет решения, что отвечает нарушению условия существования неподвижной точки x_* . Неподвижная точка x_* попадает на границу области определения $F_{\mathcal{M}}(x)$ только при тех значениях параметров, которые удовлетворяют

$$\frac{q}{\Gamma} - 1 - \frac{P}{\Gamma \alpha} = 0.$$

Отсюда, искомая бифуркационная граница [10]:

$$\mathcal{L}_{BCB} = \left\{ (\alpha, \Gamma) : \frac{q}{\Gamma} - 1 - \frac{P}{\Gamma \alpha} = 0 \right\}. \quad (6)$$

Изложенная здесь методика получения $\mathcal{L}_{BCB}$ в точности совпадает с той, которая представлена в [17] для нахождения «border-collision» границы рождения замкнутой инвариантной кривой в двумерном кусочно-гладком отображении и расчёта параметров двумерной нормальной формы.

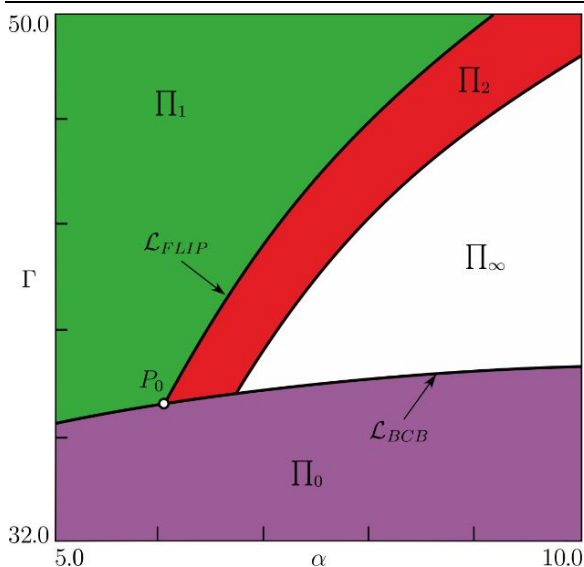


Рис. 2. Двупараметрическая бифуркационная диаграмма на плоскости α , Γ

Fig. 2. Two-dimensional bifurcation diagram in the parameter plane α , Γ

На рис. 2 приведена двупараметрическая бифуркационная диаграмма, на которую нанесены бифуркационные границы $\mathcal{L}_{FLIP}$ и $\mathcal{L}_{BCB}$, где Π_1 – область устойчивости неподвижной точки F_M ; Π_0 – область устойчивости неподвижной точки F_L ; Π_2 – область устойчивости 2-цикла и Π_∞ – область нерегулярных колебаний. Линия бифуркации удвоения периода $\mathcal{L}_{FLIP}$ опирается на границу $\mathcal{L}_{BCB}$ в точке P_0 коразмерности два.

Координаты точки $P_0 = (\alpha_0, \Gamma_0)$:

$$\alpha_0 = -\frac{P(1+e^\lambda - \lambda \cdot e^\lambda)}{q \cdot \lambda \cdot e^\lambda}, \quad \Gamma_0 = \frac{q \cdot (1+e^\lambda)}{1+e^\lambda - \lambda \cdot e^\lambda}.$$

Результаты и их обсуждение

Задачей бифуркационного анализа с точки зрения практики является выделение участков границы области устойчивости, отвечающих субкритическим

(опасным) бифуркациям. Для участка $\mathcal{L}_{FLIP}$, где реализуется классическая бифуркация удвоения периода, эта задача решается тривиально.

Что касается границы «border collision» $\mathcal{L}_{BCB}$, то динамика здесь гораздо сложнее, чем при переходе через линию $\mathcal{L}_{FLIP}$. Для прогнозирования нелинейных явлений, вызванных «border collision», в одномерных кусочно-гладких непрерывных отображениях часто используют кусочно-линейное непрерывное отображение в качестве нормальной формы [3, 6, 9, 18, 19]. Подход основан на следующем утверждении [6, 18] (см. также [8, 9]).

Утверждение. Рассмотрим семейство одномерных кусочно-гладких непрерывных отображений $F: I \rightarrow I$, $I \subseteq \mathbb{R}$, зависящих от параметра α и определяемое

$$x \mapsto F(\alpha, x). \quad (7)$$

Пусть c_B – многообразие переключения («border») отображения (7). Потребуем, что $x = c_B$ при некотором c_B и, чтобы для этого же самого значения c_B выполнялось условие

$$F(\alpha_*, c_B) - c_B = 0.$$

Определим

$$\alpha_L^* = \left. \frac{\partial F(\alpha_*, x)}{\partial x} \right|_{x=c_B-0}, \quad \alpha_R^* = \left. \frac{\partial F(\alpha_*, x)}{\partial x} \right|_{x=c_B+0}.$$

Тогда в общем случае, «border collision» бифуркация, возникающая в (7) при $\alpha = \alpha_*$, та же самая, что и в кусочно-линейном отображении («skew tent map»)

$$x \mapsto f(x),$$

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_L x + \mu, & \text{если } x < 0; \\ \alpha_R x + \mu, & \text{если } x > 0 \end{cases} \quad (8)$$

при $\mu = 0$ для $(\alpha_L, \alpha_R) = (\alpha_L^*, \alpha_R^*)$.

Заметим, что здесь рассматриваются «border collision» бифуркации, возникающие в точке $\mu = 0$, когда бифуркационный параметр μ меняет знак с «минуса» на «плюс» или наоборот. В общем случае в качестве бифуркационного можно выбрать любой из трех параметров α_L , α_R , μ [6, 18].

Далее покажем, что все параметры нормальной формы (8) являются функциями параметров отображения (1) и обладают желаемой степенью гладкости.

Начнем с небольшого предварительного замечания. Мультипликатор $F'_L(x_*) = e^\lambda$ неподвижной точки $x_* = c_L$, где $c_L = \left(\frac{q}{\Gamma} - 1 + e^\lambda - \frac{P}{\Gamma\alpha} \right) e^{-\lambda}$, удовлетворяющей $F_L(x) - x = 0$, всегда $0, 0 < F'_L(x_*) < 1, 0$ и, следовательно, x_*

устойчива. Несложно показать, что на линии $\mathcal{L}_{BCB}$ неподвижная точка x_* равна $x_* = c_L = 1, 0$. Мультипликатор другой неподвижной точки $x_* = c_R$, которая есть корень уравнения $F_R(x) - x = 0$, равен той же величине $F'_R(x_*) = e^\lambda$. Однако решение этого уравнения должно удовлетворять еще и условию $q/\Gamma = 0, 0$. Но это условие относится ко второй «border-collision» бифуркационной границе. С другой стороны, очевидно, что $q/\Gamma = 0, 0$ только тогда, когда $\Gamma = \infty$, что физически нереализуемо. Это означает, что в рассматриваемой модели «border collision» бифуркации возникают, когда неподвижная точка пересекает многообразие переключения c_L , отвечающей границе, разделяющей области определения функций $F_L(x)$ и $F_M(x)$. Но в случае периодических орбит, надо рассматривать обе границы.

Положив $c_B = c_L$, найдем:

$$\alpha_L = \frac{\partial F(\alpha, x)}{\partial x} \Big|_{x=c_B-0} = \frac{\partial F_L(\alpha, x)}{\partial x} \Big|_{x=c_B-0} = e^\lambda, \quad (9)$$

$$\alpha_R = \frac{\partial F(\alpha, x)}{\partial x} \Big|_{x=c_B+0} = \frac{\partial F_M(\alpha, x)}{\partial x} \Big|_{x=c_B+0} = e^\lambda + \frac{\lambda e^\lambda \Gamma \alpha}{P},$$

$$\mu = \frac{\partial F(\alpha_*, x)}{\partial \alpha} (\alpha - \alpha_*), \text{ где } \begin{cases} \mu < 0, & \text{если } \alpha < \alpha_*; \\ \mu > 0, & \text{если } \alpha > \alpha_*; \\ \mu = 0, & \text{если } \alpha = \alpha_*, \end{cases}$$

$$\frac{\partial F(\alpha, x)}{\partial \alpha} = \frac{P}{\Gamma \alpha^2} > 0.$$

Коэффициенты α_L и α_R рассчитываются для значений α и Γ , лежащих на линии $\mathcal{L}_{BCB}$, т.е. удовлетворяющих

$$\frac{q}{\Gamma} - 1 - \frac{P}{\Gamma\alpha} = 0.$$

Фазовое пространство отображения (8) делится на две области $\mathcal{L} = \{x \in \mathbb{R} : x < 0\}$; $\mathcal{R} = \{x \in \mathbb{R} : x > 0\}$. Неподвижные точки в областях $\mathcal{L}$ и $\mathcal{R}$

$$x_L^* = \frac{\mu}{1 - \alpha_L} \leq 0 \text{ и } x_R^* = \frac{\mu}{1 - \alpha_R} \geq 0.$$

Поскольку «border collision» бифуркация возникает при $\mu = 0$, то в точке бифуркации получаем $x_L^* = x_R^* = 0$. Устойчивость $x_{L/R}^*$ определяется коэффициентами α_L , α_R : неподвижная точка $x_{L/R}^*$ устойчива, если $|\alpha_{L/R}| < 1, 0$ и неустойчива, если $|\alpha_{L/R}| > 1, 0$. Классификация возможных бифуркаций в (8) и детальная бифуркационная диаграмма на плоскости параметров (α_L, α_R) приведены в [6, 9, 18].

Из (9) видно, что коэффициент α_L не зависит от параметров α , Γ отображения (1): $\alpha_L = e^\lambda \approx 0,81873$ (см. (9)). На участке границы $\mathcal{L}_{BCB}$, расположенном слева от точки P_0 , угловой коэффициент α_R по абсолютной величине меньше единицы. Так как в этом случае $|\alpha_{L/R}| < 1, 0$, то «border collision» переход называется «persistence» [13], означающий то, что устойчивая неподвижная точка одного типа переходит в устойчивую неподвижную точку другого типа (в [8, 9] он назван бифуркацией «простого изменения типа решения»).

На другом участке $\mathcal{L}_{BCB}$, расположенном справа от P_0 , параметр $|\alpha_R| > 1, 0$. В этом случае, в зависимости от величины α_R можно наблюдать большое многообразие нелинейных явлений, например, удвоение или умножение периода колебаний, рождение многополостного хаотического аттрактора в результате единственной бифуркации (за подробностями отсылаем к [6, 18]).

В заключение нашего обсуждения приведём несколько иллюстративных примеров, показывающих роль нормальной формы (8) в прогнозировании нелинейных явлений в кусочно-гладком отображении (1).

На рис. 3,а приведена бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая бифуркацию удвоения периода при переходе из области Π_0 в область Π_2 через границу $\mathcal{L}_{BCB}$ при $\alpha = 6,7$. На рис. 3,б показаны результаты исследований с помощью нормальной формы (8) для $\alpha_R \approx -1,21172$. Значение коэффициента $\alpha_R \approx -1,21172$ отвечает точке, лежащей на границе $\mathcal{L}_{BCB}$ при $\alpha = 6,7$. На рис. 3,в-д показаны итерационные диаграммы, показывающие бифуркационный переход.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2020; 24(3): 137-151

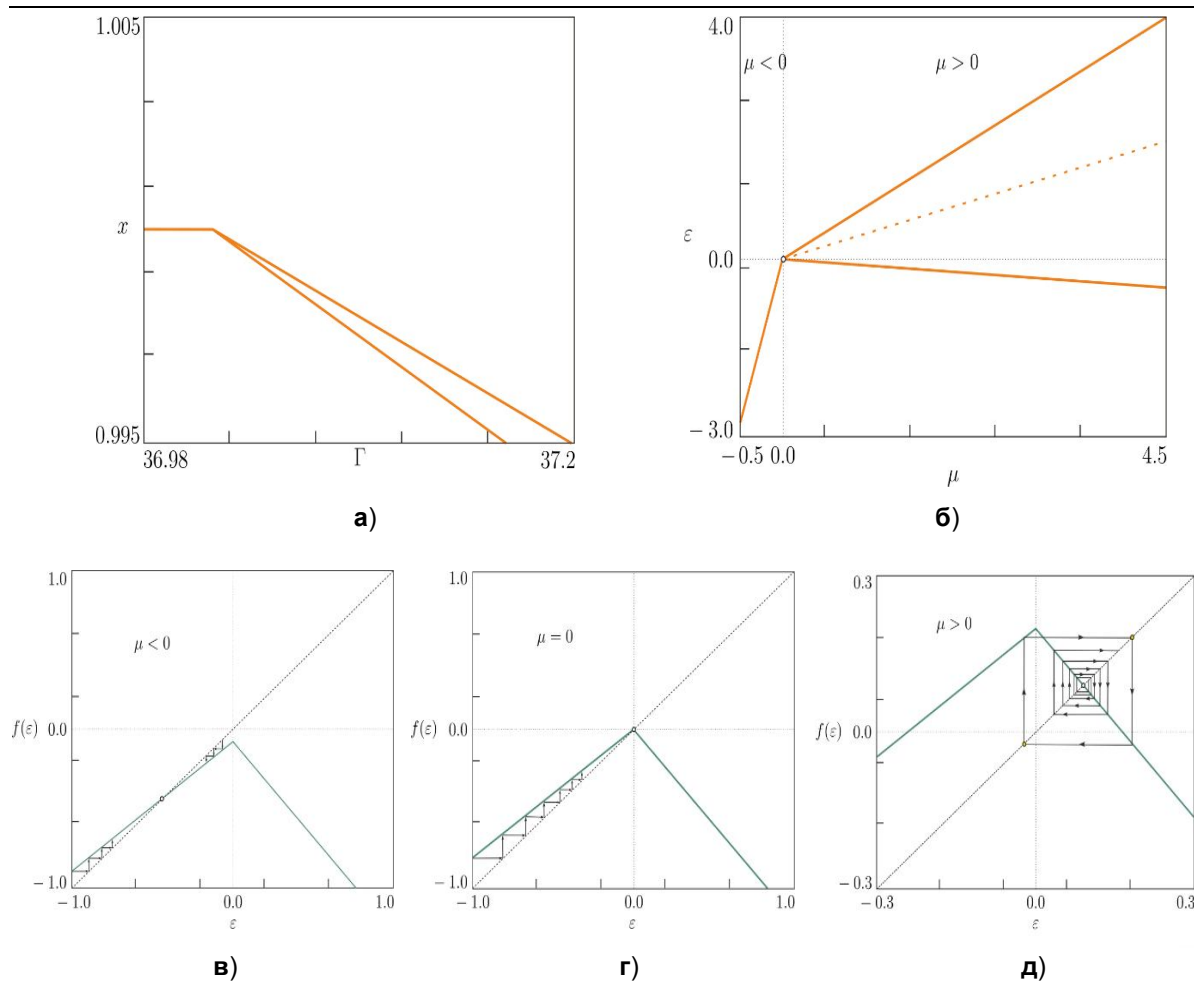


Рис. 3. Удвоение периода колебаний при $\alpha=6,7$: **а** – бифуркационная диаграмма для кусочно-гладкого отображения (1); **б** – бифуркационная диаграмма для нормальной формы (8). Параметры нормальной формы соответствуют $\alpha=6,7$: $\alpha_{\text{н}} \approx -1,21172$; **в-д** – итерационные диаграммы, иллюстрирующие динамику до, в точке и после бифуркации

Fig. 3. Period-doubling of oscillations for $\alpha=6,7$: **а** – Bifurcation diagram for the piecewise-smooth map (1); **б** – Bifurcation diagram for the normal form map (8). Parameters of the normal form map correspond to $\alpha=6,7$: $\alpha_{\text{n}} \approx -1,21172$; **в-д** – cobweb diagrams illustrating the dynamics before, at and after the bifurcation point

Как видно из этой диаграммы, в точке бифуркации $\mu=0,0$ существует асимптотически устойчивая неподвижная точка $x_{\mathcal{L}}^* = x_{\mathcal{R}}^* = 0$. После бифуркации при $\mu > 0,0$ возникают неустойчивая неподвижная точка $x_{\mathcal{R}}^*$ и устойчивый цикл с периодом 2, причем, при

$\alpha_{\mathcal{R}} \approx -1,21172$, одна точка 2-цикла находится в области $\mathcal{L}$, а другая — в области $\mathcal{R}$ (см. рис. 3(д)). На рис. 4 изображен бифуркационный переход, при котором из неподвижной точки возникает однополостный хаотический аттрактор.

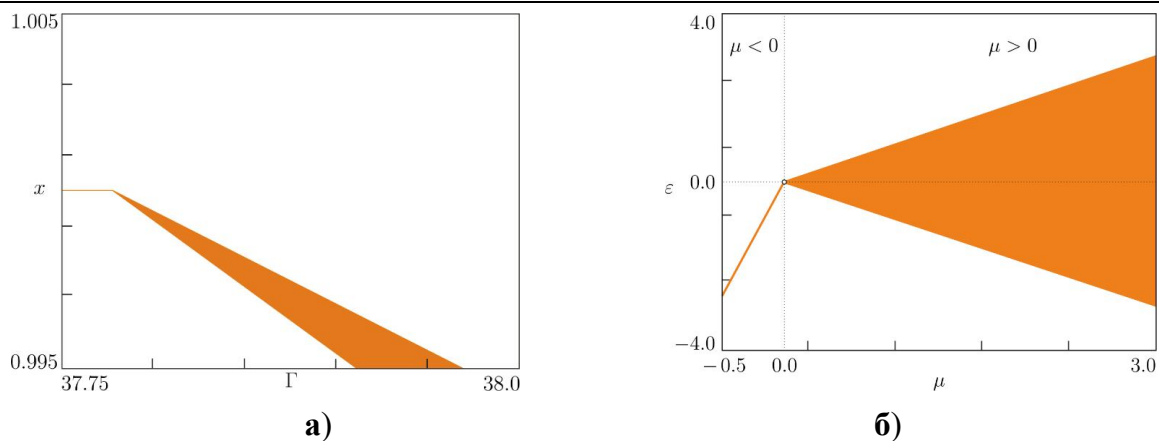


Рис. 4. Рождение однополостного хаотического аттрактора при $\alpha = 8$: **а** – Бифуркационная диаграмма для (1); **б** – Бифуркационная диаграмма для (8): $\alpha_{\text{ж}} \approx -1,63746$

Fig. 4. Birth of a single-band chaotic attractor, $\alpha = 8$: **a** – Bifurcation diagram for (1); **b** – Bifurcation diagram for (8), $\alpha_{\text{ж}} \approx -1,63746$

Выводы

В представленной работе выполнен бифуркационный анализ бимодального кусочно-гладкого отображения, описывающего поведение импульсной системы автоматического управления. В плоскости параметров построена граница области устойчивости неподвижной точки, отвечающей периодическим колебаниям с периодом модуляции.

Показано, что область устойчивости неподвижной точки ограничена двумя

бифуркационными кривыми: линиями классической бифуркации удвоения периода и «border collision» бифуркации. Описаны методики расчёта бифуркационных кривых и определения параметров нормальной формы как функции параметров исходного кусочно-гладкого отображения.

Приведены примеры, демонстрирующие роль кусочно-линейного непрерывного отображения в прогнозировании нелинейных явлений в кусочно-гладких динамических системах.

Список литературы

1. Sharkovsky A., Kolyada S., Sivak A., Fedorenko V. Dynamics of One-dimensional Maps. Dordrecht: Springer; 1997. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8897-3>
2. Bifurcations of attracting cycles from delayed Chua's circuit / Yu. L. Maistrenko, V. L. Maistrenko, S. U. Vikil, L. O. Chua // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1995. № 5 (3). P. 653–671. <https://doi.org/10.1142/S021812749500051X>
3. Bifurcations in one-dimensional piecewise smooth maps: Theory and applications in switching circuits / S. Banerjee, M. S. Karthik, G. Yuan, J. A. Yorke // *IEEE Trans. Circ. and Sys. I*. 2000. № 47 (3). P. 389–394. <https://doi.org/10.1109/81.841921>

4. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. *Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems*. Singapore: World Scientific; 2003. <https://doi.org/10.1142/5313>
5. Panchuk A., Sushko I., Schenke B., Avrutin V. Bifurcation structures in a bimodal piecewise linear map: regular dynamics. *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2013, № 23 (12). P. 1330040. <https://doi.org/10.1142/S0218127413300401>
6. *Continuous and Discontinuous Piecewise-Smooth One-Dimensional Maps: Invariant Sets and Bifurcation Structures* / V. Avrutin, L. Gardini, I. Sushko, F. Tramontana // Singapore: World Scientific. 2019. <https://doi.org/10.1142/8285>
7. *Chaotic Dynamics in Two-Dimensional Noninvertible Maps* / C. Mira, L. Gardini, A. Barugola, J. C. Cathala // Singapore: World Scientific; 1996. <https://doi.org/10.1142/2252>
8. Feigin M. I. Doubling of the oscillation period with C-bifurcations in piecewise continuous systems // *J. Appl. Math. Mech.* 1970. №34 (5). P. 822 – 830. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(70\)90064-X](https://doi.org/10.1016/0021-8928(70)90064-X)
9. Local analysis of C-bifurcations in n-dimensional piecewise-smooth dynamical systems / di M. Bernardo, M. I. Feigin, S. J. Hogan, M. E. Homer // *Chaos, Solitons and Fractals*. 1999. №10 (11). P. 1881 – 1908. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(98\)00317-8](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(98)00317-8)
10. Nusse H. E., Yorke J. A. Border-collision bifurcations including “period two to period three” for piecewise smooth systems // *Physica D*. 1992. № 57 (1-2). P. 39 – 57. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90087-4)
11. Nusse H. E., Yorke J. A. Border collision bifurcation: an explanation for observed bifurcation phenomena // *Physical Review E*. 1994. № 49. P. 1073-1076. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1073>
12. Nusse H. E., Yorke, J. A. Border-collision bifurcations for piecewise smooth one dimensional maps // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1995. № 5 (1). P. 189–207. <https://doi.org/10.1142/S0218127495000156>
13. *Piecewise-Smooth Dynamical Systems: Theory and Applications* / M. di Bernardo, C. J. Budd, A. R. Champneys, P. Kowalczyk. London: Springer-Verlag, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-708-4>
14. Dangerous bifurcations revisited / V. Avrutin, Zh. T. Zhusubaliyev, A. Saha, S. Banerjee, I. Sushko, L. Gardini // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2016. № 26 (14). P. 1630040 (24 pages). <https://doi.org/10.1142/S0218127416300408>
15. Transitions from phase-locked dynamics to chaos in a piecewise-linear map / Zh. T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, S. De, S. Banerjee // *Physical Review E*. 2008. № 77. P. 026206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.026206>
16. Border collision route to quasiperiodicity: Numerical investigation and experimental confirmation / Zh. T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, S. Maity, S. Mohanan, S. Banerjee // *Chaos*. 2006. № 16(2). P. 023122. <https://doi.org/10.1063/1.2208565>

17. Sushko I., Avrutin V., Gardini L. Bifurcation structure in the skew tent map and its application as a border collision normal form // *Journal of Difference Equations and Applications*. 2016. №22(8). P.1040–1087. <http://dx.doi.org/10.1080/10236198.2015.1113273>
18. Sushko I., Gardini L., Avrutin V. Nonsmooth one-dimensional maps: some basic concepts and definitions // *Journal of difference equations and applications*. 2016. № 22 (12). P. 1816-1870. <http://dx.doi.org/10.1080/10236198.2016.1248426> .
19. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems. *Physica D*. 2008. №237(7). P. 930 – 936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
20. Onset of chaos in a single-phase power electronic inverter / V. Avrutin, E. Mosekilde, Zh. T. Zhusubaliyev, L. Gardini // *Chaos*. 2015. №25 (4). P. 043114-1 – 043114-14. <https://doi.org/10.1063/1.4918299>

References

1. Sharkovsky A., Kolyada S., Sivak A., Fedorenko V. *Dynamics of One-dimensional Maps*. Dordrecht: Springer; 1997. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8897-3>
2. Maistrenko Yu. L., Maistrenko V. L., Vikil S. U., Chua L. O. Bifurcations of attracting cycles from delayed Chua's circuit. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 1995, no.5 (3), pp. 653–671. <https://doi.org/10.1142/S021812749500051X>
3. Banerjee S., Karthik M. S., Yuan G., Yorke J. A. Bifurcations in one-dimensional piecewise smooth maps: Theory and applications in switching circuits. *IEEE Trans. Circ. and Sys. I*, 2000, no. 47 (3), pp. 389–394. <https://doi.org/10.1109/81.841921>
4. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. *Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems*. Singapore: World Scientific, 2003. <https://doi.org/10.1142/5313>
5. Panchuk A., Sushko I., Schenke B., Avrutin V. Bifurcation structures in a bimodal piecewise linear map: regular dynamics. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2013, no. 23 (12), 1330040 p. <https://doi.org/10.1142/S0218127413300401>
6. Avrutin V., Gardini L., Sushko I., Tramontana F. *Continuous and Discontinuous Piecewise-Smooth One-Dimensional Maps: Invariant Sets and Bifurcation Structures*. Singapore: World Scientific, 2019. <https://doi.org/10.1142/8285>
7. Mira C., Gardini L., Barugola A., Cathala J. C. *Chaotic Dynamics in Two-Dimensional Noninvertible Maps*. Singapore: World Scientific, 1996. <https://doi.org/10.1142/2252>
8. Feigin M. I. Doubling of the oscillation period with C-bifurcations in piecewise continuous systems. *J. Appl. Math. Mech*, 1970, no. 34 (5), pp. 822 – 830. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(70\)90064-X](https://doi.org/10.1016/0021-8928(70)90064-X)

9. di Bernardo M., Feigin M. I., Hogan S. J., Homer M. E. Local analysis of C-bifurcations in n-dimensional piecewise-smooth dynamical systems. *Chaos, Solitons and Fractals*, 1999, no. 10 (11), pp. 1881 – 1908. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(98\)00317-8](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(98)00317-8).
10. Nusse H. E., Yorke J. A. Border-collision bifurcations including “period two to period three” for piecewise smooth systems. *Physica D*. 1992, no. 57 (1-2), pp. 39 – 57. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90087-4)
11. Nusse H. E., Yorke J. A. Border collision bifurcation: an explanation for observed bifurcation phenomena. *Physical Review E*, 1994, no. 49, pp. 1073-1076. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1073>
12. Nusse H. E., Yorke, J. A. Border-collision bifurcations for piecewise smooth one dimensional maps. *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1995, no. 5 (1), pp. 189–207. <https://doi.org/10.1142/S0218127495000156>
13. di Bernardo M., Budd C. J., Champneys A. R., Kowalczyk P. *Piecewise-Smooth Dynamical Systems: Theory and Applications*. London: Springer-Verlag, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-708-4>
14. Avrutin V., Zhusubaliyev Zh. T., Saha A., Banerjee S., Sushko I., Gardini L. Dangerous bifurcations revisited. *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2016, no. 26 (14), 1630040 p. (24 pages). <https://doi.org/10.1142/S0218127416300408>
15. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., De S., Banerjee S. Transitions from phase-locked dynamics to chaos in a piecewise-linear map. *Physical Review E*, 2008, no. 77, 026206 p. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.026206>
16. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., Maity S., Mohanan S., Banerjee S., Border collision route to quasiperiodicity: Numerical investigation and experimental confirmation. *Chaos*, 2006, no. 16(2), 023122 p. <https://doi.org/10.1063/1.2208565>
17. Sushko I., Avrutin V., Gardini L. Bifurcation structure in the skew tent map and its application as a border collision normal form. *Journal of Difference Equations and Applications*, 2016, no. 22(8), pp. 1040–1087. <http://dx.doi.org/10.1080/10236198.2015.1113273>
18. Sushko I., Gardini L., Avrutin V. Nonsmooth one-dimensional maps: some basic concepts and definitions. *Journal of difference equations and applications*. 2016, no. 22 (12), pp. 1816-1870. <http://dx.doi.org/10.1080/10236198.2016.1248426> .
19. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems. *Physica D*. 2008, no. 237(7), pp. 930 – 936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
20. Avrutin V., Mosekilde E., Zhusubaliyev Zh. T., and Gardini L. Onset of chaos in a single-phase power electronic inverter. *Chaos*, 2015, no. 25 (4), pp. 043114-1 – 043114-14. <https://doi.org/10.1063/1.4918299>

Информация об авторах / Information about the Authors

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhanybai@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5534-9902>

Zhanybai T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhanybai@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5534-9902>

Кузьмина Дарья Сергеевна, магистр кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dariakosmo@gmail.com

Daria S. Kuzmina, Master Student of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dariakosmo@gmail.com

Яночкина Ольга Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yanoolga@gmail.com

Olga O. Yanochkina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yanoolga@gmail.com

Устойчивость колебаний импульсной системы управления электроприводом

О.О. Яночкина¹✉, Е.О. Болдырева¹

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

✉ e-mail: yanoolga@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Исследование устойчивости колебаний импульсной системы управления электроприводом постоянного тока с целью обеспечения рабочих режимов с заданными динамическими характеристиками.

Методы. Анализ устойчивости периодических решений дифференциальных уравнений с разрывной правой частью сводится к задаче исследования локальной устойчивости неподвижных точек отображения.

Результаты. Проведен анализ устойчивости в зависимости от напряжения питания электропривода и коэффициента усиления корректирующего звена в цепи обратной связи. Выявлено, что граница области устойчивости на плоскости варьируемых параметров имеет ярко выраженный экстремум в виде максимума в бифуркационной точке коразмерности два, называемой еще точкой резонанса 1:2. По одну сторону от этой точки область устойчивости ограничена линией бифуркации Неймарка-Сакера, а по другую – линией бифуркации удвоения периода. Это означает, что с изменением параметров радиус области устойчивости сначала растет, достигая максимума в точке резонанса 1:2, а затем уменьшается. Этот важный вывод можно использовать в оптимизационных расчетах.

Заключение. Выполнен анализ устойчивости импульсной системы управления электроприводом постоянного тока, поведение которой описывается дифференциальными уравнениями разрывной правой частью. Задача поиска периодических решений дифференциальных уравнений сведена к задаче поиска неподвижных точек отображения. Неподвижные точки отображения удовлетворяют системе нелинейных уравнений, которая решалась численно методом Ньютона-Рафсона. Устойчивость периодических решений дифференциальных уравнений отвечает устойчивости неподвижных точек соответствующего отображения. Исследования проводились при вариации коэффициента усиления в цепи обратной связи и напряжения питания. Выявлено, что потеря неподвижной точки происходит через суперкритическую бифуркацию Неймарка-Сакера, когда при изменении параметров комплексно-сопряженная пара мультипликаторов выходит из единичного круга. Однако при увеличении напряжения питания граница бифуркации Неймарка-Сакера переходит в границу бифуркации удвоения периода в точке резонанса 1:2.

Ключевые слова: система автоматического управления электроприводом; широтно-импульсная модуляция, устойчивости периодических режимов; кусочно-гладкие отображения; бифуркация Неймарка-Сакера; бифуркация удвоения периода; точка резонанса 1:2.

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

Благодарности: Работа выполнена под руководством д.т.н., проф., профессора кафедры вычислительной техники ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» Жусубалиева Ж.Т.

Для цитирования: Яночкина О.О., Болдырева Е.О. Устойчивость колебаний импульсной системы управления электроприводом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 152-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-152-165>.

Поступила в редакцию 30.03.2020

Подписана в печать 27.04.2020

Опубликована 30.06.2020

Vibration Stability of the Impulse System of the Electric Drive Control

Olga O. Yanochkina ¹ ✉, Eugenia O. Boldyreva ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: yanoolga@gmail.com

Abstract

Purpose of research is Study of vibration stability of the impulse system of direct current electric drive in order to ensure operating modes with specified dynamic characteristics.

Methods. The stability analysis of periodic solutions of differential equations with discontinuous right-hand side is reduced to the problem of studying local stability of fixed map points.

Results. The analysis of stability is carried out depending on the supply voltage of the electric drive and the gain of the correcting link in the feedback circuit. It is revealed that the boundary of the stability region on the plane of the variable parameters has a pronounced extremum in the form of a maximum at the bifurcation point of codimension two, also called the resonance point 1: 2. On one side of this point, the stability region is bounded by the Neimark-Sacker bifurcation line, and on the other, by the period-doubling bifurcation line. This means that with a change in the parameters, the radius of the stability region first increases, reaching a maximum at the resonance point 1: 2, and then decreases. This important conclusion can be used in optimization calculations.

Conclusion. The analysis of the vibration stability of the impulse system of direct current electric drive, the behavior of which is described by differential equations of the discontinuous right-hand side, is carried out. The problem of finding periodic solutions to differential equations is reduced to the problem of finding fixed points of the map. The fixed points of the map satisfy a system of nonlinear equations, which was solved numerically by the Newton-Raphson method. The stability of periodic solutions of differential equations corresponds to the stability of fixed points of the corresponding map. The studies were carried out with variation of the gain in the feedback circuit and the supply voltage. It is revealed that the loss of a fixed point occurs through the supercritical Neimark-Sacker bifurcation, when the complex-conjugate pair of multipliers leaves the unit circle when the parameters change. However, with an increase in the supply voltage, the Neimark-Sacker bifurcation boundary passes into the period-doubling bifurcation boundary at the 1: 2 resonance point.

Keywords: electric drive automatic control system; pulse-width modulation; stability of periodic modes; piecewise smooth maps; Neimark-Sacker bifurcation; period doubling bifurcation; 1: 2 resonance point.

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

Acknowledgements: Work was carried out under the supervision of doctor of technical sciences, prof., professor of the Department of Computer Engineering of the Southwest State University Zhusubaliyev Zh. T.

Введение

Одна из основных особенностей импульсных систем автоматического управления – это колебательный режим работы с частотой модуляции, обусловленный импульсным характером преобразования энергии. Поэтому ключевой задачей при их проектировании является обеспечение устойчивости периодических режимов с заданными динамическими характеристиками в широком диапазоне вариации параметров и при воздействии помех [1,2].

Потеря устойчивости может приводить к различным нелинейным явлениям, таким как возникновение субгармонических колебаний, хаотических и квазипериодических режимов. В результате этого снижается точность регулирования скорости электропривода, на несколько порядков увеличивается амплитуда колебаний момента двигателя и угловой скорости вращения якоря. Поэтому исследование устойчивости периодических режимов при проектировании конкретного класса импульсных систем автоматического управления является важной задачей.

В качестве конкретного объекта для исследований в работе рассматривается математическая модель импульсной системы управления электроприводом постоянного тока [3]. Такая система описывается неавтономными дифференци-

альными уравнениями с разрывной правой частью [1,2]. С целью упрощения исследований математическая модель приведена к так называемой канонической форме [1,2], допускающей численно-аналитический анализ решений исходной системы дифференциальных уравнений.

Сложность решения поставленной задачи обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, для анализа устойчивости в нелинейных системах надо предварительно найти искомое периодическое движение, например, путем решения краевой задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений [2]. При этом важно, чтобы выбранный численный метод позволял находить как устойчивые, так и неустойчивые режимы. Таким образом, задачи поиска периодических режимов и исследования их локальной устойчивости в нелинейных системах неразрывны.

Во-вторых, импульсные системы автоматического управления обычно описываются дифференциальными уравнениями с разрывными правыми частями. Существующая теория устойчивости, разработанная для гладких дифференциальных уравнений, не применима для таких уравнений.

Поэтому возможны два пути решения этой задачи: использовать теорию устойчивости разрывных систем [2,4,5,6], для применения которой в практи-

ческих задачах требуется специальная подготовка, или применить методы современной бифуркационной теории кусочно-гладких отображений.

В представленной работе для анализа устойчивости выбран второй путь, а именно, полученные дифференциальные уравнения с разрывной правой частью в безразмерной форме сведены к кусочно-гладкому непрерывному отображению. Тогда задача поиска периодических решений дифференциальных уравнений упрощается за счёт того, что отпадает необходимость решения сложной краевой задачи для уравнений с разрывной правой частью. В итоге эта задача сводится к задаче поиска неподвижных точек отображения, а устойчивость периодических решений дифференциальных уравнений отвечает устойчивости неподвижных точек соответствующего отображения. Неподвижные точки полученного отображения удовлетворяют системе нелинейных уравнений, которые решались численно методом Ньютона-Рафсона.

Проведен анализ устойчивости в зависимости от напряжения питания и коэффициента усиления корректирующего звена в цепи обратной связи.

Выявлено, что граница области устойчивости на плоскости варьируемых параметров имеет ярко выраженный экстремум в виде максимума в бифуркационной точке коразмерности два, называемой еще точкой резонанса 1:2 [7]. По одну сторону точки коразмерности два область устойчивости ограни-

чена линией бифуркации Неймарка-Саккера [7], а по другую – линией бифуркации удвоения периода.

Материалы и методы

Назначение рассматриваемой системы состоит в том, чтобы автоматически поддерживать скорость электропривода на заданном уровне или автоматически осуществлять слежение за задающим сигналом, закон изменения которого определяется конкретной задачей управления работой производственных механизмов. Как было отмечено во введении, основная цель исследований заключается в построении области устойчивости рабочих режимов в пространстве параметров.

На рис. 1 представлена схема замещения этой системы [3]. Здесь VT – полупроводниковый преобразователь, VD – обратный диод, E_0 – источник постоянного напряжения. Объектом управления является электродвигатель постоянного тока M . В качестве датчика обратной связи используется тахогенератор VS , определяющий угловую скорость вращения якоря ω . Регулятор состоит из усилителя сигнала ошибки DA_2 и источника опорного напряжения V_{ref} . Величина V_{ref} пропорциональна значению угловой скорости ω . Модулятор включает в себя компаратор DA_1 , устройство выборки-хранения S/H , генератор тактовых импульсов V_{clock} и формирователь пилообразного сигнала $V_{ramp}(t)$.

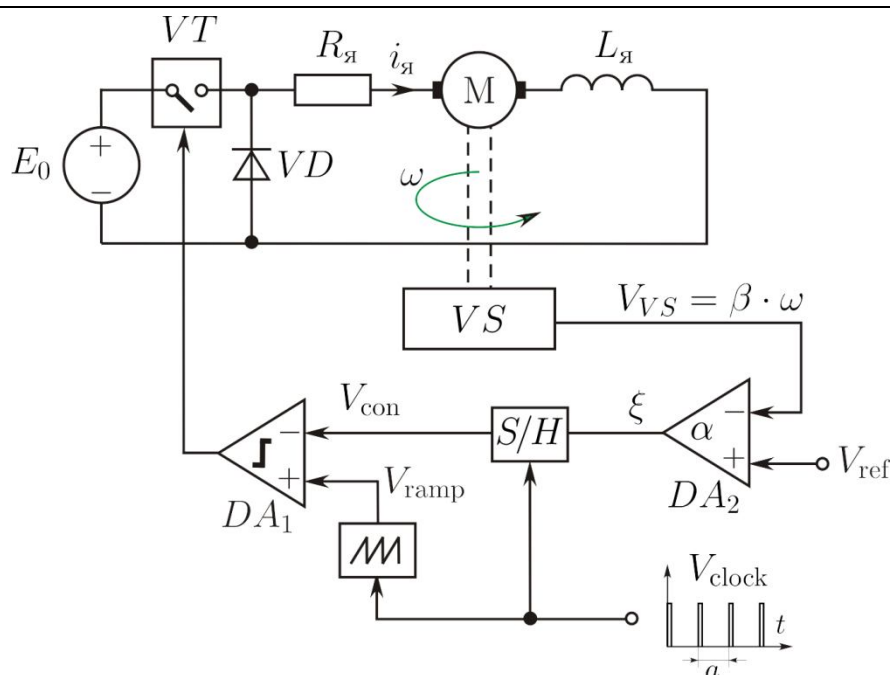


Рис. 1. Схема замещения системы управления

Fig. 1. Equivalent circuit of the control system

Поведение такой системы согласно схеме замещения, приведенной на рис. 1, описывается неавтономными дифференциальными уравнения с разрывной правой частью [3]

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} x_1 - \frac{C_{\omega}}{L_{\text{я}}} x_2 + \frac{E_0}{L_{\text{я}}} K_{\text{F}}, \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{C_{\omega}}{J} x_1 - \frac{M_{\text{c}}}{J}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $K_{\text{F}} = \frac{1}{2} (1 - \text{sign}(\xi_k - V_{\text{ramp}}(t)))$,

$$\xi_k = \xi(t) \big|_{t=a \lfloor t/a \rfloor},$$

$$\xi(t) = \alpha \cdot (V_{\text{ref}} - \beta x_2(t));$$

$$V_{\text{ramp}}(t) = \frac{V_0}{\alpha} (t/a - \lfloor t/a \rfloor).$$

Здесь x_1 – ток якоря $i_{\text{я}}$; x_2 – угловая скорость вращения якоря ω ; $L_{\text{я}}$ и $R_{\text{я}}$ – соответственно, суммарная индуктивность и сопротивление якорной цепи

двигателя; C_{ω} – постоянная двигателя; J – момент инерции, приведённый к валу двигателя; M_{c} – статический момент на валу двигателя.

В отличие от системы, рассмотренной в [3], в представленной работе исследуется система с широтно-импульсной модуляцией первого рода [1]. В (1) ξ и K_{F} – соответственно, сигналы на входе и на выходе модулятора; $\lfloor t/a \rfloor$ – функция, выделяющая целую часть аргумента t/a ; $V_{\text{vs}} = \beta x_2$ – выходное напряжение тахогенератора VS , где β – чувствительность датчика скорости; V_{ref} , V_0 – сигнал задания и опорный сигнал модулятора; α – коэффициент усиления корректирующего звена DA_2 ; a – период следования импульсов тактового генератора.

Для выбранных значений параметров собственные значения λ_1 и λ_2 матрицы коэффициентов системы (1) действительны и отрицательны [1,2]:

$$\lambda_1 = -\frac{R_{\text{я}}}{2 \cdot L_{\text{я}}} + \sqrt{\frac{R_{\text{я}}^2}{4L_{\text{я}}^2} - \frac{C_{\omega}^2}{J \cdot L_{\text{я}}}};$$

$$\lambda_2 = -\frac{R_{\text{я}}}{2 \cdot L_{\text{я}}} - \sqrt{\frac{R_{\text{я}}^2}{4L_{\text{я}}^2} - \frac{C_{\omega}^2}{J \cdot L_{\text{я}}}}.$$

От переменных x_1, x_2 перейдем к безразмерным переменным x, y с помощью замены [2]:

$$x_1 = \frac{E_0}{L_{\text{я}}(\lambda_1 - \lambda_2)} \left(\frac{\lambda_2 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}}}{\lambda_1} x - \frac{\lambda_1 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}}}{\lambda_2} y \right),$$

$$x_2 = \frac{E_0 \cdot C_{\omega}}{J \cdot L_{\text{я}}(\lambda_2 - \lambda_1)} \left(\frac{x}{\lambda_1} - \frac{y}{\lambda_2} \right). \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) и разрешив (1) относительно производных, получим [2]

$$\dot{x} = \lambda_1 (x - K_{\text{F}} + \Omega_1);$$

$$\dot{y} = \lambda_2 (y - K_{\text{F}} + \Omega_2), \quad (3)$$

$$K_{\text{F}} = \frac{1}{2} (1 - \text{sign}(\zeta_k)), \quad \zeta_k = \varphi_k - \eta(t),$$

$$\varphi_k = \nu y_k - x_k + q,$$

$$\eta(t) = \frac{P}{\alpha} (t/a - \lfloor t/a \rfloor),$$

$$x_k = x(ka), \quad y_k = y(ka), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь

$$P = \frac{V_0 C_{\omega} (\lambda_2 - \lambda_1)}{\beta \lambda_2 E_0}; \quad q = \frac{V_{\text{ref}}}{V_0} P; \quad \nu = \frac{\lambda_1}{\lambda_2};$$

$$\Omega_1 = \frac{M_c C_{\omega}}{E_0 \cdot J \cdot (\lambda_2 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}})};$$

$$\Omega_2 = \frac{M_c C_{\omega}}{E_0 \cdot J \cdot (\lambda_1 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}})}.$$

Уравнения (3) были сведены к кусочно-гладкому отображению [2]

$$x_{k+1} = e^{a\lambda_1} (x_k - 1 + \Omega_1) + e^{a\lambda_1} (1 - z_k) - \Omega_1;$$

$$y_{k+1} = e^{a\lambda_2} (y_k - 1 + \Omega_2) + e^{a\lambda_2} (1 - z_k) - \Omega_2, \quad (4)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots,$$

$$\text{где } z_k = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi_k < 0; \\ 1, & \text{при } \varphi_k > \frac{P}{\alpha}; \\ \frac{\alpha}{P} \cdot \varphi_k, & \text{при } 0 \leq \varphi_k \leq \frac{P}{\alpha}, \end{cases}$$

$$\text{где } \varphi_k = \nu y_k - x_k + q.$$

Результаты и их обсуждение

Напомним, что рабочий режим рассматриваемой системы – вынужденные периодические колебания с периодом модуляции.

Потеря устойчивости этого режима при вариации параметров может приводить к возникновению субгармонических колебаний или квазипериодических режимов, а при определенных условиях и к хаотизации колебаний. В результате этого снижается точность регулирования скорости электропривода, на несколько порядков увеличивается амплитуда колебаний тока якоря и угловой скорости, что снижает показатели качества управления.

Исследования проводились при следующих значениях параметров [3]

$$R_{\text{я}} = 0,53 \text{ Ом}, \quad L_{\text{я}} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C_{\omega} = 0,362 \text{ В} \cdot \text{с}, \quad J = 0,001884 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_c = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad V_{\text{ref}} = 3 \text{ В}; \quad V_0 = 10 \text{ В};$$

$$\beta = 0,0318 \text{ В/с}; \quad a = 0,001; \quad E_0 = 100 \text{ В};$$

$$0 < \alpha < 120.$$

В качестве варьируемых параметров были выбраны напряжение питания E_0 и коэффициент усиления α . Напомним, что вынужденным периодическим колебаниям с периодом модуляции отвечает неподвижная точка отображения (4).

На рис. 2,а приведена однопараметрическая бифуркационная диаграмма, рассчитанная в диапазоне изменения коэффициента усиления $34,0 < \alpha < 40,0$ и $E_0 = 35,0$, а на рис. 2,б изображена зависимость комплексно-сопряженной па-

ры мультипликаторов $\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$ неподвижной точки от α (годограф мультипликаторов).

Как можно видеть из графиков $\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$, при $\alpha < \alpha_{NS}$ существует устойчивая гиперболическая неподвижная точка: мультипликаторы $\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$ находятся внутри единичного круга, так как $|\rho_{1,2}| = \sqrt{\mu^2 + \gamma^2} < 1$. Такая неподвижная точка называется устойчивым фокусом.

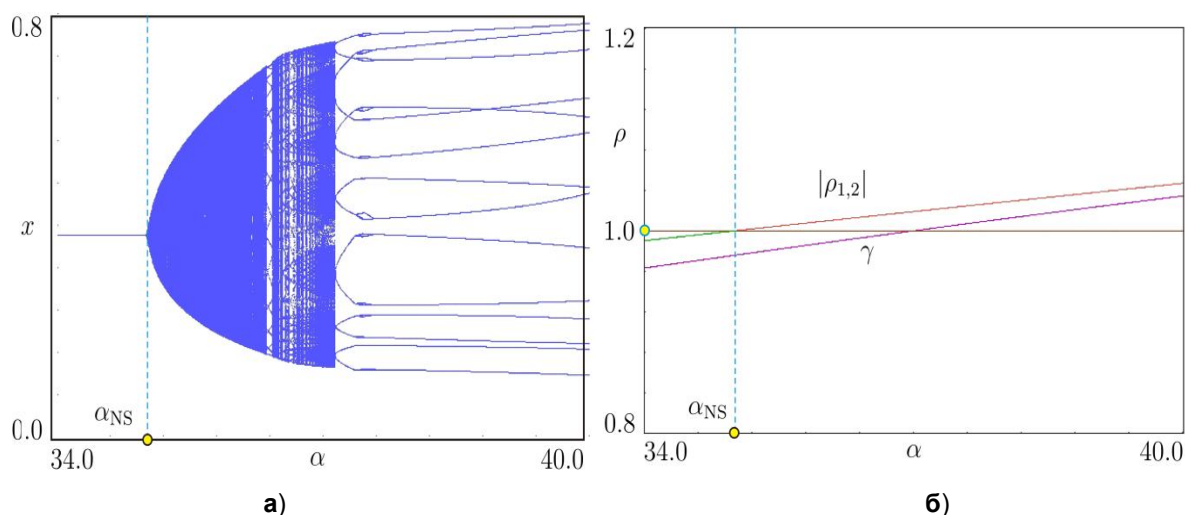


Рис. 2. Бифуркация Неймарка-Сакера: **а** – бифуркационная диаграмма; **б** – годограф

комплексно-сопряжённой пары мультипликаторов, где $|\rho_{1,2}|$ – модуль мультипликаторов

$$\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$$

Fig. 2. Neimark-Sacker bifurcation: **a** – bifurcation diagram; **b** – hodograph of a complex conjugate

pair of multipliers, where $|\rho_{1,2}|$ is the modulus of multipliers $\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$

В точке $\alpha = \alpha_{NS}$ комплексно-сопряженная пара мультипликаторов $\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$ выходит на границу единичного круга: $|\rho_{1,2}| = \sqrt{\mu^2 + \gamma^2} = 1$. В этом случае говорят, что неподвижная точка становится негиперболической.

Для анализа устойчивости таких инвариантных множеств линейная теория, которую мы используем, не работает, поскольку для негиперболических неподвижных точек поведение траекторий линеаризованной и исходной системы может быть принципиально различным.

Но эта неподвижная точка негрубая: малое шевеление параметров превращает негиперболическую неподвижную точку в гиперболическую. Можно показать, что негиперболическая неподвижная точка с комплексно-сопряженной парой мультипликаторов, лежащих на границе единичного круга, является асимптотически устойчивой.

Заметим, что границей области устойчивости являются те значения параметров, при которых неподвижная точка оказывается негиперболической. Как показано на рис. 2,б, при дальнейшем увеличении параметра α комплексно-сопряженная пара мультипликаторов $\rho_{1,2} = \mu \pm i \cdot \gamma$ выходит из единичного круга: $|\rho_{1,2}| = \sqrt{\mu^2 + \gamma^2} > 1$. В результате этого неподвижная точка становится неустойчивым фокусом.

Потеря устойчивости приводит к мягкому рождению двухчастотных квазипериодических колебаний (как показано на рис. 2,а). Таким колебаниям в фазовом пространстве отображения отвечает замкнутая инвариантная кривая. Такой переход называется суперкритической бифуркацией Неймарка-Сакера [7].

В области параметров с квазипериодической динамикой существуют окна с периодической динамикой, отвечающие явлению захвата частот или резонансу, когда движение на замкнутой инвариантной кривой становится периодическим. На рис. 2,а хорошо видна область резонансного периодического

режима с периодом 14. Этим областям в пространстве параметров отвечают так называемые языки Арнольда [7–15].

Как показали исследования, при вариации параметров граница бифуркации Неймарка-Сакера переходит в линию бифуркации удвоения периода в точке коразмерности два, где оба мультипликатора обращаются в минус единицу $\rho_1 = \rho_2 = -1, 0$. Это так называемая точка резонанса 1:2, где выполняются два бифуркационных условия – бифуркации Неймарка-Сакера [7] и бифуркации удвоения периода [7,16–21].

На рис. 3 показаны бифуркационные кривые на плоскости параметров (E_0, α) . Область устойчивости неподвижной точки расположена слева этих кривых. Линия бифуркации Неймарка-Сакера переходит в линию бифуркации удвоения периода в точке коразмерности два, называемой точкой резонанса 1:2.

На рис. 4,а показана бифуркационная диаграмма зависимости мультипликаторов до точки резонанса 1:2 при $E_0=80$ В. На этом участке потеря устойчивости приводит к возникновению двухчастотных квазипериодических колебаний. На рис. 4,б хорошо виден момент выхода комплексно-сопряженных мультипликаторов за границу единичного круга. В той части границы, расположенной выше точки резонанса 1:2, потеря устойчивости, когда один из мультипликаторов выходит из единичного круга через -1 , приводит к удвоению периода колебаний (рис.5,а,б).

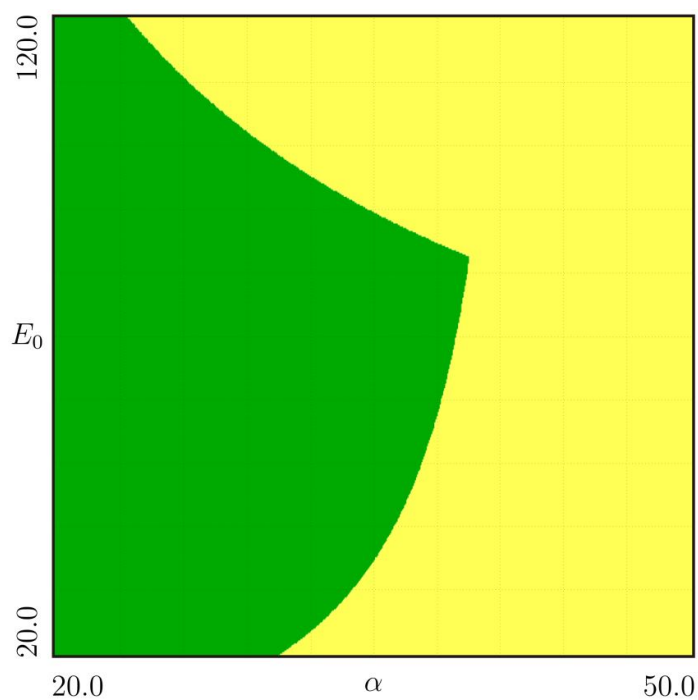


Рис. 3. Бифуркационная диаграмма на плоскости параметров (α, E_0)

Fig. 3. Bifurcation diagram in the (α, E_0) parameter plane

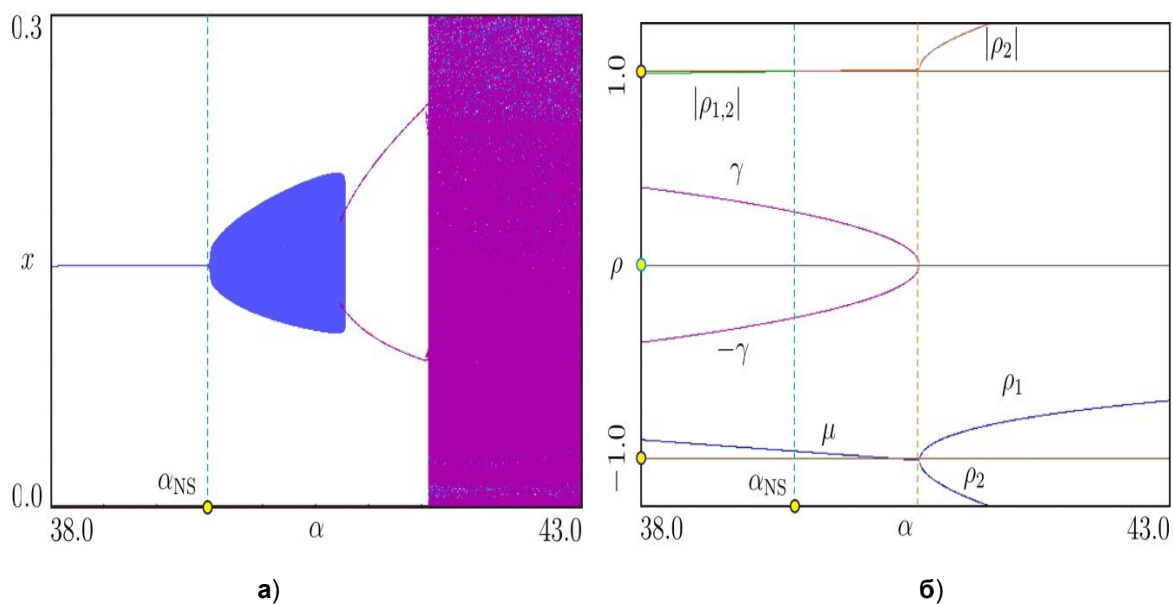


Рис. 4. Динамика вблизи точки резонанса 1:2: **а** – бифуркационная диаграмма, $E_0 = 80$ В; **б** – годограф мультипликаторов

Fig. 4. Dynamics near the resonance point 1:2: **a** – bifurcation diagram, $E_0 = 80$ В, **б** – hodograph of multipliers

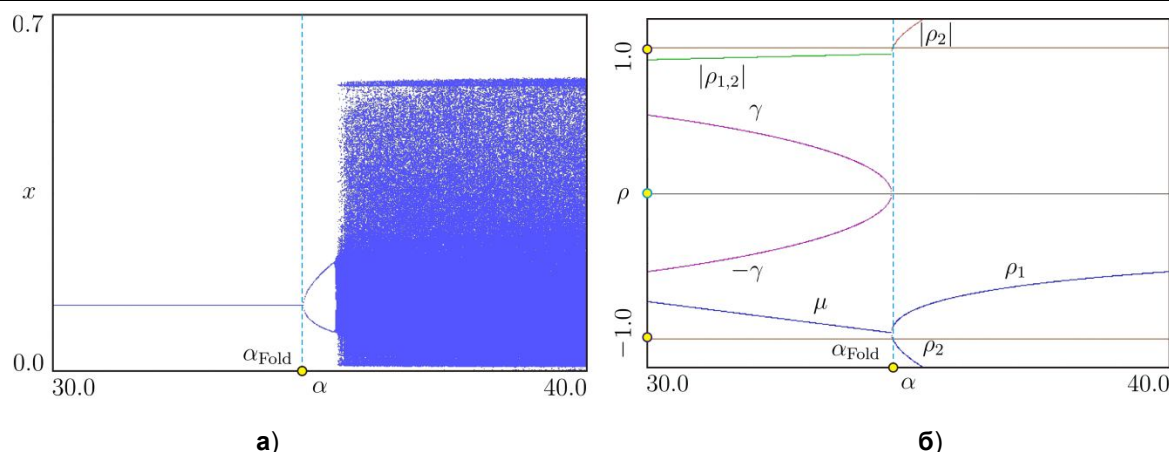


Рис. 5. Бифуркация удвоения периода: **а** – бифуркационная диаграмма; **б** – годограф мультипликаторов

Fig. 5. Period-doubling bifurcation: **a** – bifurcation diagram; **b** – hodograph of multipliers

Отметим, что с увеличением напряжения питания радиус области устойчивости по коэффициенту усиления растет, достигая максимума в точке резонанса 1:2, а затем уменьшается. Этот важный вывод можно использовать в оптимизационных расчетах.

Выводы

В представленной работе исследована устойчивость импульсной системы автоматического управления электроприводом постоянного тока, описываемой дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью. Уравнения движения приведены к так называемой канонической форме, допускающей численно-аналитический анализ решений. Полученные дифференциальные уравнения в безразмерной форме сведены к двумерному кусочно-гладкому непрерывному отображению.

Задача поиска периодических решений дифференциальных уравнений сведена к задаче поиска неподвижных

точек двумерного отображения. Неподвижные точки этого отображения удовлетворяют системе нелинейных уравнений, которая решалась численно методом Ньютона-Рафсона. Устойчивость периодических решений дифференциальных уравнений отвечает устойчивости неподвижных точек соответствующего отображения.

Выполнены исследования устойчивости периодических режимов в зависимости от коэффициента усиления в цепи обратной связи и напряжения питания. Выявлено, что потеря неподвижной точки отображения происходит через бифуркацию Неймарка-Сакера, когда при вариации параметров комплексно-сопряженная пара мультипликаторов выходит за границу единичного круга. Однако при увеличении напряжения питания граница бифуркации Неймарка-Сакера переходит в границу бифуркации удвоения периода в точке резонанса 1:2.

Список литературы

1. Хаотическая динамика импульсных систем / Ж. Т. Жусубалиев, В. Г. Рубанов, В. С. Титов, О. О. Яночкина. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018.
2. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. Singapore: World Scientific; 2003. <https://doi.org/10.1142/5313>
3. Зотин Д. В., Михальченко Г.Я. Режимы функционирования электропривода постоянного тока с импульсным регулированием // Проблемы автоматизации энергосберегающих технологий: сборник научных трудов / под. ред. Г.Я. Михальченко. Брянск: Изд.-во БГТУ, 2001. С. 79 –87.
4. Feigin M. Doubling of the oscillation period with C-bifurcations in piecewise continuous systems // J. Appl. Math. Mech. 1970. Vol. 34. № (5)6. P. 822–830. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(70\)90064-X](https://doi.org/10.1016/0021-8928(70)90064-X)
5. Filippov A.F. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7793-9>
6. Piecewise-Smooth Dynamical Systems: Theory and Applications / di M. Bernardo, C. J. Budd, A. R. Champneys, P. Kowalczyk. London: Springer-Verlag, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-708-4>
7. Kuznetsov Yu. Elements of Applied Bifurcation Theory. New York, Springer, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3978-7>
8. Bifurcations from an invariant circle for two-parameter families of maps of the plane / D. G. Aronson, M. A. Chory, G. R. Hall, R.P. McGehee // A computer-assisted study. Comm. Math. Physics. 1982, vol. 83. № 3. P. 303–354. <https://doi.org/10.1007/BF01213607>
9. Global bifurcations of closed invariant curves in two-dimensional maps: A computer assisted study / A. Agliari, G.-I. Bischi, R. Dieci, L. Gardini // Int. J. Bifurcation Chaos. 2005. Vol. 15. № 4. P. 1285–1328, <https://doi.org/10.1142/S0218127405012685>
10. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Torus birth bifurcation in a DC/DC converter // IEEE Trans. Circ. & Sys. I. 2006. Vol. 53. № 8. P. 1839–1850. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2006.879060>
11. Sushko I., Gardini L. Center Bifurcation for a Two-Dimensional border-Collision Normal Form // Int. J. Bifurcation Chaos. 2008. Vol. 18. №4. P. 1029–1050. <https://doi.org/10.1142/S0218127408020823>
12. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems // Physica D. 2008. Vol. 237, № 7. P. 930 – 936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
13. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Direct transition from a stable equilibrium to quasiperiodicity in non-smooth systems // Physics Letters A. 2008. Vol. 372, № 13. P. 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.077>

14. Zhusubaliyev Zh. T., Soukhoterlin E., Mosekilde E. Quasiperiodicity and torus breakdown in a power electronic DC/DC converter // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2007. Vol. 73, № 6. P. 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.021>
15. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., Yanochkina O.O. Torus bifurcations in multi-level converter systems // *Int. J. Bifurcation Chaos*. 2011. Vol. 21, № 8. P. 2343-2356. <https://doi.org/10.1142/S0218127411029835>
16. An Exploration of Dynamical Systems and Chaos / J. Argyris, G. Faust, M. Haase, R. Friederich. New York: Springer. 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46042-9>
17. Alligood K.T., Sauer T.D., Yorke J. A. Chaos: An Introduction to Dynamical Systems. New York: Springer, 2000. <https://doi.org/10.1007/b97589>
18. Parker T. S. Chua L.O. Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9>
19. Strogatz S. H. Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering. 2nd ed. Boulder: Westview Press, 2015. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2751>
20. Palis J., De Melo W. Geometric Theory of Dynamical Systems. New York, Berlin: Springer-Verlag, 1982. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5703-5>
21. Avrutin V., Gardini L., Sushko I., Tramontana F. Continuous and Discontinuous Piecewise-Smooth One-Dimensional Maps: Invariant Sets and Bifurcation Structures. Singapore: World Scientific, 2019. <https://doi.org/10.1142/8285>

References

1. Zhusubaliyev Zh. T., Rubanov V. G., Titov V. S., Yanochkina O. O. *Xaoticheskaya dinamika impul'snykh sistem* [Chaotic dynamics of impulse systems]. Belgorod, 2018 (In Russ.)
2. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. *Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems*. Singapore: World Scientific, 2003. <https://doi.org/10.1142/5313>
3. Zotin D. V., Mikhal'chenko G.Ya. [Modes of operation of a DC electric drive with pulse control]. *Problemy avtomatizatsii energosberegayushchikh tekhnologii*. Sbornik nauchnykh trudov [Problems of automation of energy-saving technologies: collection of scientific papers]. Bryansk, BGTU Publ., 2001, pp. 79-87 (In Russ.)
4. Feigin M. Doubling of the oscillation period with C-bifurcations in piecewise continuous systems. *J. Appl. Math. Mech*, 1970, vol. 34, no. (5)6, pp. 822–830. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(70\)90064-X](https://doi.org/10.1016/0021-8928(70)90064-X)
5. Filippov A.F. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers; 1988. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7793-9>

6. di Bernardo M., Budd C. J., Champneys A. R., Kowalczyk P. *Piecewise-Smooth Dynamical Systems: Theory and Applications*. London, Springer-Verlag, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-708-4>
7. Kuznetsov Yu. *Elements of Applied Bifurcation Theory*. New York, Springer, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3978-7>
8. Aronson D. G., Chory M. A., Hall G. R., McGehee R.P. Bifurcations from an invariant circle for two-parameter families of maps of the plane. A computer-assisted study. *Comm. Math. Physics*, 1982, vol. 83, no.3, pp. 303–354. <https://doi.org/10.1007/BF01213607>
9. Agliari A., Bischi G.-I., Dieci R., Gardini L. Global bifurcations of closed invariant curves in two-dimensional maps: A computer assisted study. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 2005, vol. 15, no. 4, pp. 1285–1328. <https://doi.org/10.1142/S0218127405012685>
10. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Torus birth bifurcation in a DC/DC converter. *IEEE Trans. Circ. & Sys. I*. 2006, vol. 53, no. 8, pp. 1839–1850. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2006.879060>
11. Sushko I., Gardini L. Center Bifurcation for a Two-Dimensional border-Collision Normal Form. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 2008, vol. 18, no. 4, pp. 1029–1050. <https://doi.org/10.1142/S0218127408020823>
12. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems. *Physica D.*, 2008, vol. 237, no. 7, pp. 930 – 936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
13. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Direct transition from a stable equilibrium to quasiperiodicity in non-smooth systems. *Physics Letters A.*, 2008, vol. 372, no. 13, pp. 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.077>
14. Zhusubaliyev Zh. T., Soukhoterlin E., Mosekilde E. Quasiperiodicity and torus breakdown in a power electronic DC/DC converter. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2007, vol. 73, no. 6, pp. 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.021>
15. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., Yanochkina O.O., Torus bifurcations in multi-level converter systems. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 2011, vol. 21, no. 8, pp. 2343-2356. <https://doi.org/10.1142/S0218127411029835>
16. Argyris J., Faust G., Haase M., Friederich R. *An Exploration of Dynamical Systems and Chaos*. New York: Springer; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46042-9>
17. Alligood K.T., Sauer T.D., Yorke J. A. *Chaos: An Introduction to Dynamical Systems*. New York: Springer, 2000. <https://doi.org/10.1007/b97589>
18. Parker T. S. Chua L.O. *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9>
19. Strogatz S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. 2nd ed. Boulder, Westview Press, 2015. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2751>

20. Palis J., De Melo W. *Geometric Theory of Dynamical Systems*. New York, Berlin: Springer-Verlag, 1982. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5703-5>

21. Avrutin V., Gardini L., Sushko I., Tramontana F. *Continuous and Discontinuous Piecewise-Smooth One-Dimensional Maps: Invariant Sets and Bifurcation Structures*. Singapore: World Scientific, 2019. <https://doi.org/10.1142/8285>

Информация об авторах / Information about the Authors

Яночкина Ольга Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yanoolga@gmail.com

Olga O. Yanochkina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yanoolga@gmail.com

Болдырева Евгения Олеговна, студент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: eugeniaboldyreva@yandex.ru

Eugenia O. Boldyreva, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: eugeniaboldyreva@yandex.ru

К расчету инвариантных многообразий кусочно-гладких отображений

Ж. Т. Жусубалиев¹✉, В. Г. Рубанов², Ю. А. Гольцов²

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

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: zhanybai@gmail.com

Резюме

Целью исследования является разработка алгоритма расчета устойчивых инвариантных многообразий седловых периодических орбит кусочно-гладких отображений.

Метод базируется на итерировании фундаментальной области вдоль устойчивого подпространства собственных векторов матрицы Якоби, вычисленной в седловой периодической неподвижной точке.

Результаты. Разработан метод расчета устойчивых инвариантных многообразий седловых периодических орбит кусочно-гладких отображений. Основным результатом сформулирован в виде утверждения. Основу метода составляет оригинальный подход нахождения обратной функции, идея которого состоит в сведении задачи к нелинейному уравнению первого порядка.

Заключение. Описан численный метод расчета устойчивых инвариантных многообразий кусочно-гладких отображений, моделирующих импульсные системы автоматического управления. Метод базируется на итерировании фундаментальной области вдоль устойчивого подпространства собственных векторов матрицы Якоби, вычисленной в седловой периодической неподвижной точке. Основу метода составляет оригинальный подход нахождения обратной функции, который состоит в сведении задачи к решению нелинейного уравнения первого порядка. Такой подход исключает необходимость решения систем нелинейных уравнений для определения обратной функции и преодоления сопутствующих при этом вычислительных проблем. Приведены примеры исследования глобальной динамики кусочно-гладких отображений с мультистабильным поведением.

Ключевые слова: кусочно-гладкое отображение; инвариантные многообразия седловой периодической орбиты; гомоклинический контакт; замкнутая инвариантная кривая; «final» бифуркация; бифуркация Неймарка-Сакера; квазипериодические колебания.

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

Финансирование. Рубанов В.Г. поддержан грантом: Договор 03/19 от 03.03.2019 г. в рамках Соглашения № 075-11-2019-070 от 29.11.2019 (уникальный номер 07519SU2000000).

Для цитирования: Жусубалиев Ж. Т., Рубанов В. Г., Гольцов Ю. А. К расчету инвариантных многообразий кусочно-гладких отображений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 166-182. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-166-182>.

Поступила в редакцию 21.05.2020

Подписана в печать 03.06.2020

Опубликована 30.06.2020

© Жусубалиев Ж. Т., Рубанов В. Г., Гольцов Ю. А. , 2020

Calculation of Invariant Manifolds of Piecewise-Smooth Maps

Zhanybai T. Zhusubaliyev ¹ ✉, Vasiliy G. Rubanov ², Yuriy A. Gol'tsov ²

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

¹ Belgorod State Technological University
Kostyukov str. 46, Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: zhanybai@gmail.com

Abstract

Purpose of research is of the work is to develop an algorithm for calculating stable invariant manifolds of saddle periodic orbits of piecewise smooth maps.

Method is based on iterating the fundamental domain along a stable subspace of eigenvectors of the Jacobi matrix calculated at a saddle periodic fixed point.

Results. A method for calculating stable invariant manifolds of saddle periodic orbits of piecewise smooth maps is developed. The main result is formulated as a statement. The method is based on an original approach to finding the inverse function, the idea of which is to reduce the problem to a nonlinear first-order equation.

Conclusion. A numerical method is described for calculating stable invariant manifolds of piecewise smooth maps that simulate impulse automatic control systems. The method is based on iterating the fundamental domain along a stable subspace of eigenvectors of the Jacobi matrix calculated at a saddle periodic fixed point. The method is based on an original approach to finding the inverse function, which consists in reducing the problem to solving a nonlinear first-order equation. This approach eliminates the need to solve systems of nonlinear equations to determine the inverse function and overcome the accompanying computational problems. Examples of studying the global dynamics of piecewise-smooth mappings with multistable behavior are given.

Keywords: piecewise smooth map; invariant manifolds of the saddle periodic orbit; homoclinic contact; closed invariant curve; "final" bifurcation; Neimark-Sacker bifurcation; quasiperiodic oscillations.

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

Funding: Rubanov V.G. supported by the grant: Agreement 03/19 dated 03.03.2019 under the Agreement No. 075-11-2019-070 dated 29.11.2019 (unique number 07519SU2000000).

For citation: Zhusubaliyev Zh. T., Rubanov V. G., Gol'tsov Yu. A. Calculation of Invariant Manifolds of Piecewise-Smooth Maps // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 166-182 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-166-182>.

Received 21.05.2020

Accepted 03.06.2020

Published 30.06.2020

Введение

Как известно, глобальная устойчивость является редким свойством нели-

нейных динамических систем, поскольку из этого свойства вытекает, что существует единственный аттрактор, ко-

торый притягивает все траектории фазового пространства. Однако большинство задач из механики, физики, теории систем автоматического управления, силовой электроники, биологии, экономики и социальных наук приводят к моделям, которые демонстрируют мультистабильное поведение [1-7], когда при одних и тех же параметрах сосуществуют несколько аттракторов.

Особенность мультистабильных систем состоит в их высокой чувствительности к внешним помехам. Даже сколь угодно малые случайные возмущения или вариации параметров могут приводить к непрогнозируемым изменениям динамики, например, к внезапному переходу от одного периодического движения к другому, либо к взрывной хаотизации колебаний.

Для изучения нелинейных явлений в мультистабильных системах требуется найти специальные инвариантные множества, такие как репеллеры, седловые периодические орбиты вместе с их устойчивыми и неустойчивыми многообразиями, играющие ключевую роль в глобальной динамике [8-10]. Устойчивые и неустойчивые инвариантные многообразия нельзя рассчитать ни аналитически, ни с помощью техники линеаризации. Сейчас разработано несколько численных методов расчета устойчивых и неустойчивых инвариантных множеств [11-19].

Стандартный подход состоит в итерации так называемой фундаментальной области (fundamental domain) (см., например, [8, 11]), когда итерируется

локальная область в окрестности седловой периодической орбиты вдоль устойчивого и неустойчивого собственных подпространств. Все эти методы работают одинаково, поскольку устойчивое многообразие вычисляется как неустойчивое многообразие обратной функции, полученной явно, или численно, например, методом Ньютона.

Н. Osinga и др. [14] предложили численный метод расчета устойчивых одномерных инвариантных многообразий двумерных отображений, не требующий определения обратной функции или ее аппроксимации. Это так называемый «Search Circle (SC)» алгоритм [14]. Такой подход особенно важен в тех случаях, когда нельзя получить отображение Пуанкаре аналитически для заданного векторного поля. Можно его использовать и в случае, когда отображение необратимо. Метод реализован в виде прикладной программы в пакете DsTool и в настоящее время является одним из эффективных в своем классе.

Мы предлагаем численный алгоритм расчета устойчивого инвариантного многообразия седловых периодических орбит семейства кусочно-гладких отображений, моделирующих импульсные системы автоматического управления и устройства силовой электроники. Основу алгоритма составляет оригинальный метод построения обратной функции, исключающий необходимость численного решения систем нелинейных уравнений и преодоления сопутствующих при этом вычислительных проблем.

Для тестирования и исследования нашего метода мы использовали программу, где реализован «Search Circle (SC)» алгоритм. Программа была любезно предоставлена проф. Н. М. Osinga.

Материалы и методы

Рассмотрим семейство отображений $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$:

$$F: (x, y) \mapsto F(x, y),$$

$$F(x, y) = \begin{cases} F_L(x, y), & (x, y) \in D_L, \\ F_M(x, y), & (x, y) \in D_M, \\ F_R(x, y), & (x, y) \in D_R. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $F(x, y)$ кусочно-гладкая вектор-функция.

Не ограничивая общности, будем рассматривать конкретное кусочно-гладкое отображение, относящееся к (1), в котором

$$F_L(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(x-1)+1 \\ \beta(y-1)+1 \end{pmatrix};$$

$$F_M(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha x \\ \beta y \end{pmatrix};$$

$$F_R(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(x-1)+\alpha^{1-z} \\ \beta(y-1)+\beta^{1-z} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$z = \frac{\Gamma}{q}(x - \vartheta y) + \Gamma \Leftrightarrow q + x - \vartheta y - \frac{q}{\Gamma}z = 0.$$

Здесь $\alpha, \beta, \vartheta, \Gamma, q$ – параметры.

Каждая из $F_L(x, y)$, $F_M(x, y)$ и $F_R(x, y)$ – функция класса C^1 и монотонна во всей своей области определения:

$$D_L = \left\{ (x, y) : \vartheta y - x < \frac{\Gamma-1}{\Gamma} \cdot q \right\},$$

$$D_M = \left\{ (x, y) : \frac{\Gamma-1}{\Gamma} \cdot q \leq \vartheta y - x \leq q \right\},$$

$$D_R = \left\{ (x, y) : \vartheta y - x > q \right\}.$$

Границы D_L, D_M, D_R – это точки $(x, y) \in D \subset \mathbb{R}^2$, где производные первого порядка $F(x, y)$ по (x, y) не существуют. Границу между областями определения F_L, F_R, F_M называют «border». Здесь $D = D_L \cup D_M \cup D_R$.

Отображение (1), (2) было введено в [20] для исследования бифуркаций замкнутых инвариантных кривых и с тех пор оно изучалось многими авторами (см., например, [21]). К этому же классу относятся отображения, рассмотренные в [22, 23, 24].

Описание нашего метода начнем с нескольких предварительных замечаний и определений.

- Рассмотрим отображение

$$F: \mathbf{x} \mapsto F(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad (3)$$

где F – гладкая функция класса C^1 . Там, где это необходимо, будем записывать (3) в эквивалентной форме

$$F: \mathbf{x}' \mapsto F(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x}', \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n.$$

Здесь $\mathbf{x}'$ называется образом точки $\mathbf{x}$ первого ранга. Любая точка $\mathbf{x}$, такая что $F(\mathbf{x}) = \mathbf{x}'$ называется прообразом $\mathbf{x}'$ ранга один. Образы и прообразы ранга- k обозначают $F^k(\mathbf{x})$ и $F^k(\mathbf{x})$, соответственно. Здесь $\underbrace{F^k(\mathbf{x}) = F(F(\dots F(\mathbf{x})\dots))}_k$.

- Определение 1. Точка $\mathbf{x}_0$ называется неподвижной, если $F(\mathbf{x}_0) - \mathbf{x}_0 = 0$.

• Определение 2 [8]. Пусть A – матрица Якоби, вычисленная в x_0 . Собственные числа $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ матрицы A называются *мультипликаторами* неподвижной точки.

Пусть n_-, n_0 и $n_+, n_0 + n_- + n_+ = n$ – число мультипликаторов, лежащих внутри, на границе и вне единичного круга $\{\rho \in \mathbb{C}^1 : |\rho| = 1\}$, соответственно. Неподвижная точка называется *гиперболической*, если $n_0 = 0$, т.е. если нет мультипликаторов, лежащих на границе единичного круга. Неподвижная точка устойчива, если все мультипликаторы лежат внутри единичного круга, т.е. $|\rho_i| < 1, i = \overline{1, n}$. Гиперболическая неподвижная точка называется гиперболическим седлом, если $n_- n_+ \neq 0$. Заметим, что для периодических орбит с периодом m аналогичным образом можно определить свойство гиперболичности, сводя задачу к случаю неподвижной точки отображения $F^m(x_0)$.

• Теорема о локальном устойчивом многообразии [8]. Пусть x_0 гиперболическая неподвижная точка с $n_0 = 0, n_- + n_+ = n$. Тогда пересечения $W^s(x_0)$ и $W^u(x_0)$ с достаточно малой окрестностью x_0 содержат гладкие локальные многообразия $W_{loc}^s(x_0)$ и $W_{loc}^u(x_0)$ размерности n_- и n_+ соответственно. Более того, $W_{loc}^s(x_0)$ и $W_{loc}^u(x_0)$ касаются в неподвижной точке x_0 подпространств собственных векторов E^s и E^u матрицы A . Здесь E^s и E^u – устойчивое и неустойчивое подпро-

странства собственных векторов, для которых, соответственно, мультипликаторы $|\rho| < 1$ и $|\rho| > 1$.

На рис. 1 показан пример инвариантных многообразий на $\mathbb{R}^2$ для положительных $0 < \rho_2 < 1.0$ и $\rho_1 > 1.0$. В этом случае существуют два одномерных инвариантных многообразия, проходящие через неподвижную точку x_0 , а именно, одномерное устойчивое многообразие $W^s(x_0)$, образованные орбитами, сходящимися к неподвижной точке x_0 при итерации F и одномерное неустойчивое многообразие $W^u(x_0)$, образованные орбитами, сходящимися к x_0 при итерации F^{-1} .

Прежде чем продолжить изложение, сделаем несколько важных замечаний [8]. Во-первых, орбита дискретной системы – это последовательность точек. Все орбиты, не лежащие на инвариантных многообразиях, проходят через окрестность x_0 и, в конечном итоге, покидают эту окрестность. Во-вторых, инвариантные кривые не являются орбитами, в действительности это бесконечное множество орбит. В третьих, как можно видеть из рис. 1, многообразия $W^{s/u}(x_0)$ состоят из двух ветвей $W^{s/u}_{\pm}(x_0)$, разделенных x_0 . Если мультипликаторы отрицательные – $-1.0 < \rho_2 < 0.0$ и $\rho_1 < -1.0$, то орбиты на многообразиях «прыгают» между ветками $W^{s/u}_{-}(x_0)$ и $W^{s/u}_{+}(x_0)$. В этом случае многообразия $W^{s/u}_{\pm}(x_0)$ инвариантны для второй итерации F^2 отображения [8].

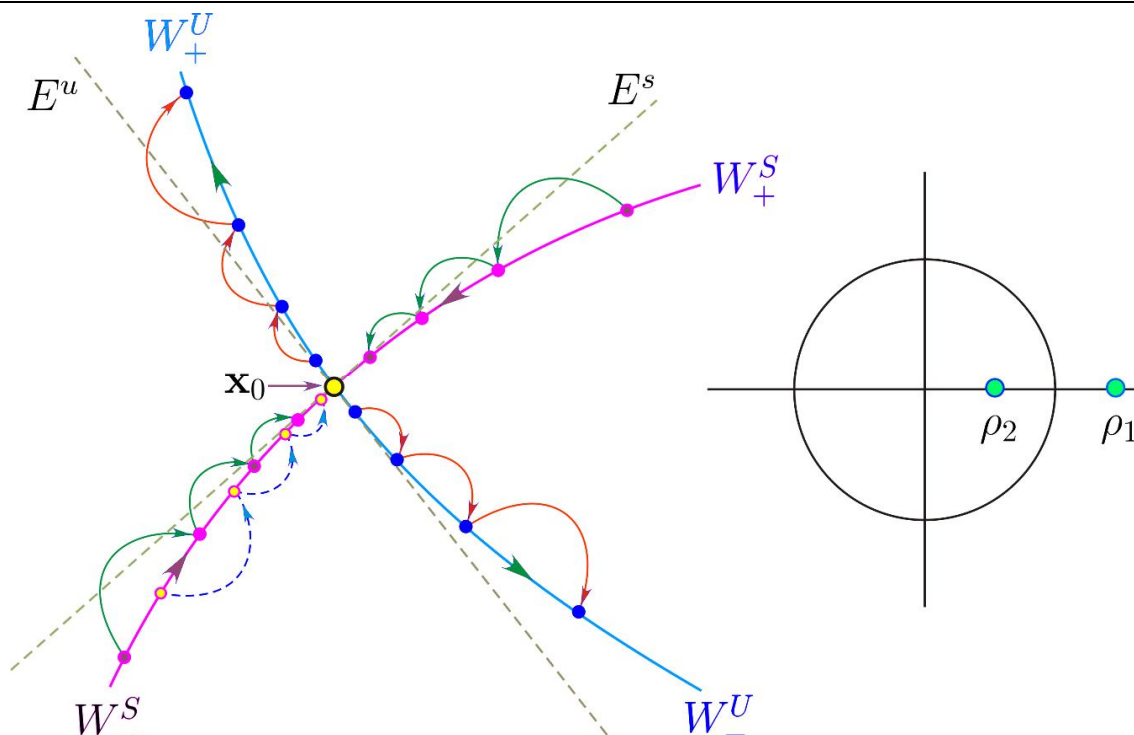


Рис. 1. Инвариантные многообразия на $\mathbb{R}^2$ для положительных ρ_1 и ρ_2

Fig. 1. Invariant manifolds in $\mathbb{R}^2$ for positive ρ_1 and ρ_2

• Для необратимых или кусочно-гладких отображений теорема не может быть применена напрямую. Поэтому потребуем, чтобы F в (1) была дифференцируемой в неподвижной точке $x_0 = (x_0, y_0)$. Это условие обеспечивает существование малой окрестности U точки x_0 , где F является диффеоморфизмом. Следовательно, теорема гарантирует существование в U локального устойчивого $W^s_{\text{loc}}(x_0) \subset U$ и неустойчивого $W^u_{\text{loc}}(x_0) \subset U$ многообразий:

$$W^s_{\text{loc}}(x_0) = \{x \in U : F^k(x) \rightarrow x_0, \quad k \rightarrow \infty\},$$

$$W^u_{\text{loc}}(x_0) = \{x \in U : F^{-k}(x) \rightarrow x_0, \quad k \rightarrow \infty\}.$$

• Тогда глобальные устойчивые и неустойчивые многообразия определяются как объединение обратных и прямых итераций $W^s_{\text{loc}}(x_0)$ и $W^u_{\text{loc}}(x_0)$:

$$W^s(x_0) = \bigcup_{k=1}^{\infty} F^{-k}(W^s_{\text{loc}}(x_0));$$

$$W^u(x_0) = \bigcup_{k=1}^{\infty} F^k(W^u_{\text{loc}}(x_0)). \quad (4)$$

Так как F_L и F_R – линейные функции, то F_L^{-1} и F_R^{-1} находятся без труда. Остается найти F_M^{-1} .

Основной наш результат формулируется в виде следующего утверждения.

• Утверждение. Пусть

$$F(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(x-1) + \alpha^{1-z} \\ \beta(y-1) + \beta^{1-z} \end{pmatrix},$$

$$q + x - \beta y - \frac{q}{\Gamma} z = 0. \quad (5)$$

Тогда существует

$$F_M^{-1}(x, y) = \begin{pmatrix} x'/\alpha - \alpha^{-z} + 1 \\ y'/\beta - \beta^{-z} + 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$q+1-\vartheta y+\frac{x'}{\alpha}-\frac{\vartheta y'}{\beta}-\frac{1}{\alpha^z}+\frac{\vartheta}{\beta^z}-\frac{q}{\Gamma}z=0, (7)$$

такая, что F_M и F_M^{-1} взаимно обратные монотонные функции.

• Доказательство.

Запишем $F_M: (x, y) \mapsto F_M(x, y)$ в эквивалентном виде

$$x' = \alpha(x-1) + \alpha^{1-z}; \quad y' = \beta(y-1) + \beta^{1-z}, \quad (8)$$

$$q+x-\vartheta y-\frac{q}{\Gamma}z=0.$$

Компоненты вектор-функции (6) получаются из первых двух уравнений (8):

$$x = x'/\alpha - \alpha^{-z} + 1; \quad y = y'/\beta - \beta^{-z} + 1. \quad (9)$$

Для того чтобы получить (7), подставим выражения (9) в третье уравнение (8):

$$q+1-\vartheta+\frac{x'}{\alpha}-\frac{\vartheta y'}{\beta}-\frac{1}{\alpha^z}+\frac{\vartheta}{\beta^z}-\frac{q}{\Gamma}z=0. (10)$$

Прделав то же самое с (9) и (10), получим (5) и (8). Монотонность F_M^{-1} следует из монотонности F_M . Непосредственно из (1) и (2) легко доказать, что F_M^{-1} определена в

$$D_M^* = \left\{ (x', y') : q+1-\vartheta-\frac{1}{\alpha}+\frac{\vartheta}{\beta}-\frac{q}{\Gamma} \leq \frac{\vartheta y'}{\beta}-\frac{x'}{\alpha} \leq q \right\},$$

а области определений F_L^{-1} и F_R^{-1} :

$$D_L^* = \left\{ (x', y') : \frac{\vartheta y'}{\beta}-\frac{x'}{\alpha} < q+1-\vartheta-\frac{1}{\alpha}+\frac{\vartheta}{\beta}-\frac{q}{\Gamma} \right\},$$

$$D_R^* = \left\{ (x', y') : \frac{\vartheta y'}{\beta}-\frac{x'}{\alpha} > q \right\}.$$

Таким образом, для любой точки $(x, y) \in D_M$ обратная итерация F_M выполняется в два шага: сначала по (x', y') вычисляется z ($0 < z < 1.0$), численно решив уравнение (10). Полученное z подставляется в (6).

Как показали исследования, такой подход, для рассматриваемого класса моделей по эффективности эквивалентен «Search Circle (SC)» алгоритму.

Результаты и их обсуждение

Проиллюстрируем работу алгоритма на примере отображения (1) - (2). Отображение (1) - (2) является одним из базовых моделей для исследования двухчастотных колебаний в кусочно-гладких динамических системах с мультистабильным поведением. Двухчастотные режимы широко распространены в природе и технике. Такие колебания характеризуются двумя независимыми частотами. В фазовом пространстве динамической системы (1) - (2) двухчастотным колебаниям отвечает аттрактор в форме замкнутой инвариантной кривой. Характер движения на инвариантной кривой определяется числом вращения, которое представляет собой отношение частот. Когда оно иррационально, инвариантная кривая плотно заполняется траекториями и динамика квазипериодична.

При рациональном числе вращения на замкнутой кривой лежит пара периодических орбит: устойчивая и седловая, а сама инвариантная кривая образована неустойчивыми многообразиями седловой орбиты. Это относится к случаю захвата частот, когда происходит синхронизация колебаний с двумя независимыми частотами в одно периодическое колебание с общим периодом. Причем отношение частот постоянно и рационально на интервале значений параметров [8].

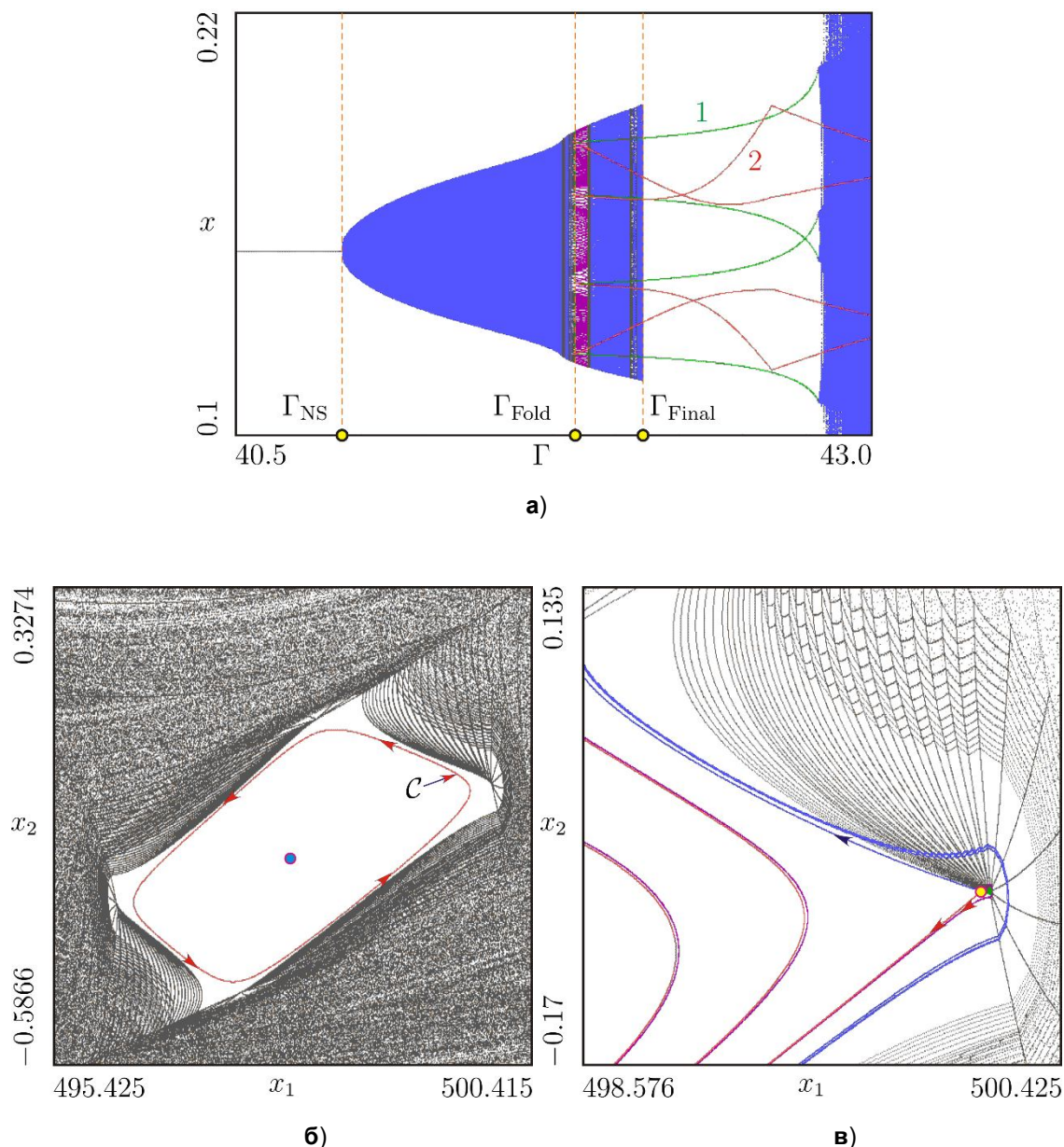


Рис. 2. Возникновение квазипериодических колебаний: **а** – бифуркационная диаграмма; **б** – фазовый портрет квазипериодического аттрактора, $\Gamma = 41.7$; **в** – фазовый портрет вблизи точки Γ_{Fold} «border collision fold» бифуркации, $\alpha = 41.83216$

Fig. 2. Appearance of quasiperiodic oscillations: **a** – bifurcation diagram; **б** – phase portrait for the quasiperiodic attractor, $\Gamma = 41.7$; **в** – phase portrait near the border collision fold bifurcation point Γ_{Fold} , $\alpha = 41.83216$

В качестве первого примера рассмотрим отображение, в котором F_L , F_M и F_R имеют вид (2). Отображение является дискретной математической моделью импульсной системы автоматического управления температурным полем нагревательной установки.

Исследования проводились при следующих значениях параметров, $\alpha = 0.969233234448$, $\beta = 0.99687987773$, $\vartheta = 10.0$, $q = 1.5697879251$. В качестве варьируемого был выбран Γ .

Для наглядности фазовые портреты приводятся в исходных переменных

$$x_1 = 2860.055 \cdot \frac{x - y}{1 - y}, \quad x_2 = -89.3767(x - y).$$

Здесь x_1 – температура нагревательной установки, x_2 – производная x_1 по времени t . На рис. 2 приведены результаты бифуркационного анализа, выполненные $40.05 < \Gamma < 43.0$. На рис. 2,а изображена бифуркационная диаграмма. При увеличении Γ неподвижная точка теряет устойчивость в точке Γ_{NS} и мягко возникают квазипериодические колебания через суперкритическую бифуркацию Неймарка – Сакера. Как показано на рис. 2,б, в фазовом пространстве отображения (1) – (2) таким колебаниям отвечает замкнутая инвариантная кривая S .

При дальнейшем изменении параметра в точке Γ_{Fold} возникают устойчивый и седловой циклы периода 4 через «border-collision fold» бифуркацию. Это аналог седло-узловой бифуркации в гладких системах.

Заметим, что «border-collision» – это специальный тип бифуркаций, когда инвариантное множество, например, неподвижная точка, сталкивается с границей («border»), разделяющей области определения двух функций: F_L, F_M или F_R, F_M .

На рис. 2,в показан увеличенный фрагмент фазового портрета, рассчитанного вблизи точки Γ_{Fold} . Как можно видеть из этого рисунка, устойчивый 4-цикл сосуществует с хаотическим аттрактором.

Заметим, что хаотический аттрактор возникает через разрушение замкнутой инвариантной кривой. Как известно, разрушению инвариантной кривой всегда предшествуют резонансные явления. На рис. 2,а хорошо видны многочисленные окна с периодической динамикой, отвечающие резонансам на инвариантной кривой. Механизмы разрушения инвариантных кривых и переходы к хаосу в кусочно-гладких системах до некоторой степени подробно изучены авторами работ [25, 26]. Поэтому мы не будем останавливаться на этом, а отсылаем читателя к публикациям [25, 26] (см. также цитируемую там литературу).

Для большей наглядности, на рис. 3,а,б изображен фазовый портрет для $\Gamma = 42.0$, иллюстрирующий сосуществование хаотического аттрактора с устойчивым 4-циклом. Границей бассейнов притяжения сосуществующих аттракторов являются устойчивые многообразия $W_{\pm}^s$ седлового 4-цикла.

Фазовые портреты на рис. 3,в,г демонстрируют так называемую «final» бифуркацию («boundary crises»). В точке Γ_{Final} происходит контакт (аналог касания в гладких отображениях) между устойчивым $W_{\pm}^s$ и неустойчивым $W_{\pm}^u$ многообразиями седлового 4-цикла в точках негрубой гомоклинической орбиты. В результате этого хаотический аттрактор разрушается и исчезает, становясь хаотическим репеллером.

Как показано на бифуркационной диаграмме (рис. 2,а), после «final» бифуркации остается только один аттрактор – устойчивый 4-цикл. На бифурка-

ционной диаграмме ветка, обозначенная цифрой 1, отвечает устойчивому 4-циклу, а цифрой 2 – седловому 4-циклу.

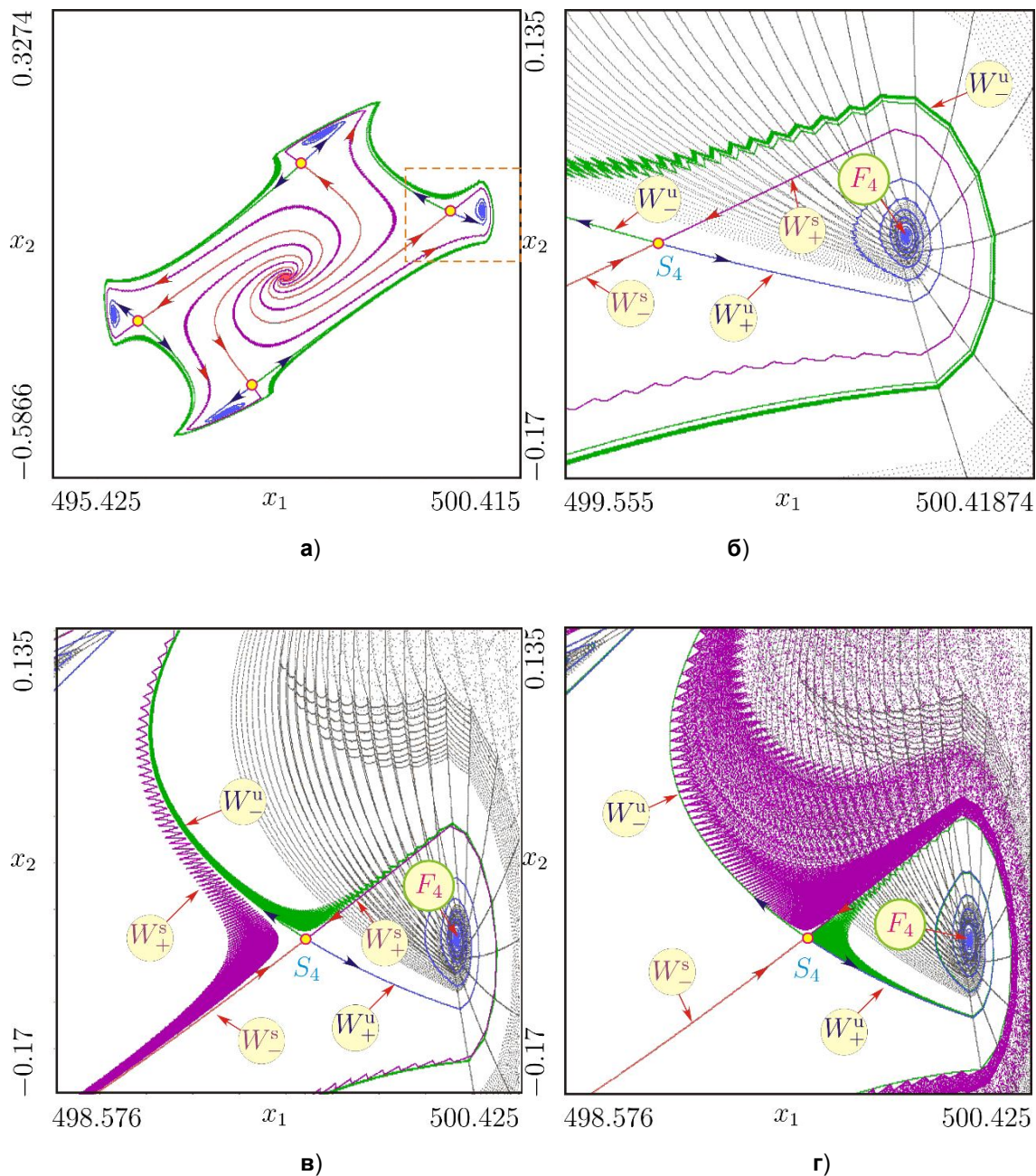


Рис. 3. «Final» бифуркация: **а, б** – сосуществование хаотического аттрактора с устойчивым 4 – циклом, $\Gamma = 42.0$; **в, г** – фазовые портреты, иллюстрирующие «boundary crises» в окрестности точка Γ_H , где **в** – первый гомоклинический контакт, $\Gamma = 42.1035$; **г** – второй гомоклинический контакт, $\Gamma = 42.129$

Fig. 3. “Final” bifurcation: **а, б** – coexistence of a chaotic attractor with a stable 4-cycle, $\Gamma = 42.0$; **в, г** – phase portraits illustration a boundary crises in the neighborhood of the point Γ_H , where **в** – shows the first homoclinic contact, $\Gamma = 42.103$, and **г** – illustrates the second homoclinic contact, $\Gamma = 42.129$

Однако в действительности, при таком переходе возникает кусочно-гладкое притягивающее множество, образованное неустойчивыми многообразия седлового 4-цикла и периодическими точками S_4 и F_4 . Как можно видеть на рис. 3(а) и 3(б), инвариантные многообразия $W_{\pm}^s, W_{\pm}^u$ – кусочно-гладкие множества, имеющие «изломы» в точках их пересечения с «borders». Однако как на устойчивом $W_{\pm}^s$, так и на неустойчивом $W_{\pm}^u$ многообразиях существуют изломы, которые не являются точками пересечения с «borders». Такие точки – это образы и прообразы точек пересечения $W_{\pm}^s, W_{\pm}^u$ с «borders», соответственно. На рис. 2 и 3 образы «borders» обозначены серым цветом.

В качестве второго примера возьмем отображение класса (1), где

$$F_L(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(x - 1 + \theta_1) - \theta_1 + 1 \\ \beta(y - 1 + \theta_2) - \theta_2 + 1 \end{pmatrix};$$

$$F_R(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(x + \theta_1) - \theta_1 \\ \beta(y + \theta_2) - \theta_2 \end{pmatrix};$$

$$F_M(x, y) = \begin{pmatrix} \alpha(x - 1 + \theta_1) - \theta_1 + \alpha^{1-z} \\ \beta(y - 1 + \theta_2) - \theta_2 + \beta^{1-z} \end{pmatrix};$$

$$z = \frac{\Gamma}{q}(\vartheta y - x) + \Gamma.$$

Области определения функций F_L, F_M и F_R :

$$D_L = \left\{ (x, y) : x - \vartheta y < \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \cdot q \right\},$$

$$D_M = \left\{ (x, y) : \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \cdot q \leq x - \vartheta y \leq q \right\},$$

$$D_R = \left\{ (x, y) : x - \vartheta y > q \right\}.$$

Отображение описывает поведение системы импульсного управления элект-

троприводом мобильных роботов. Параметры:

$$\alpha = 0.85608833963, \quad \beta = 0.42972135484, \\ \theta_1 = 0.16543088193, \quad \theta_2 = 0.030433786677, \\ \vartheta = 0.1839667801, \quad q = 0.062136687407.$$

Безразмерные переменные x, y связаны с размерными величинами x_1 и x_2 :

$$x_1 = 204.62891695(y - x);$$

$$x_2 = 253.04326794x - 46.551555229y.$$

Здесь x_1 и x_2 – ток якоря и угловая скорость вращения якоря двигателя, соответственно.

На рис. 4,а приведена однопараметрическая бифуркационная диаграмма, рассчитанная в диапазоне изменения $38.0 < \Gamma < 41.5$. Бифуркационная диаграмма содержит две ветви. Одна ветвь начинается с устойчивого 5-цикла, который возникает в области $\Gamma < 38.0$ в паре седловым 5-циклом через «border-collision fold» бифуркацию. При увеличении Γ наблюдается классический каскад бифуркаций удвоения периода, завершающийся переходом к хаосу. При дальнейшем увеличении параметра хаотический аттрактор исчезает через «final» бифуркацию, становясь хаотическим репеллером. В точке области Γ_{NS} возникает замкнутая инвариантная кривая из теряющей устойчивость неподвижной точки через бифуркацию Неймарка-Сакера. В точке Γ_{Fold} на бифуркационной диаграмме рождается пара 5-циклов через седло-узловую бифуркацию. При дальнейшем увеличении Γ происходит захват (резонанс), когда орбита на замкнутой инвариантной кривой становится периодической.

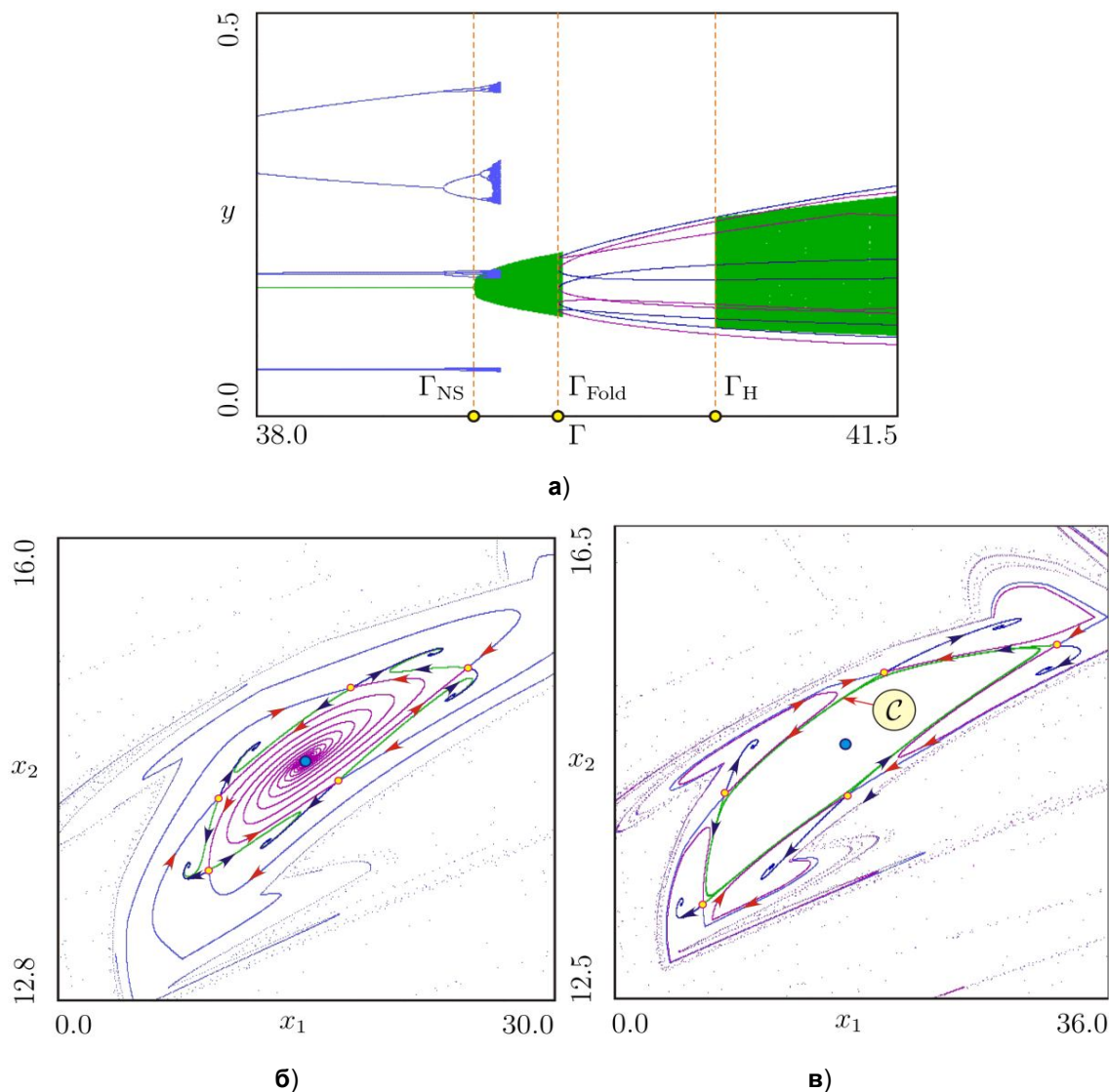


Рис. 4. Рождение замкнутой инвариантной кривой: **а** – бифуркационная диаграмма; **б** – фазовый портрет резонансной замкнутой инвариантной кривой, $\Gamma = 40.0$; **в** – фазовый портрет для $\Gamma = 41.0$, где инвариантная кривая орбитой C с квазипериодической орбитой сосуществует с устойчивым 5-циклом

Fig. 4. The birth of a closed invariant curve: **a** – bifurcation diagram; **б** – phase portrait of the resonant closed invariant curve, $\Gamma = 40.0$; **в** – phase portrait for $\Gamma = 41.0$, where an invariant curve with an orbit C with a quasiperiodic orbit coexists with a stable 5-cycle

В результате этого возникает инвариантная кривая с резонансной структурой, образованная неустойчивыми многообразиями седлового 5-цикла (рис. 4,б).

При переходе через точку Γ_H траектории на инвариантной кривой становятся квазипериодическими. В области $\Gamma > \Gamma_H$ инвариантная кривая C с квазипе-

риодической орбитой сосуществует с устойчивым 5-циклом. Границей бассейнов притяжения сосуществующих аттракторов являются устойчивые многообразия седлового 5-цикла (рис. 4,в).

Цель представленной статьи заставляет нас ограничиться краткой информацией о бифуркациях хаотических ат-

тракторов и свойствах глобальных инвариантных многообразий. За подробностями отсылаем к [8, 14, 27].

Выводы

Описан численный метод расчета устойчивых инвариантных многообразий кусочно-гладких отображений, моделирующих импульсные системы автоматического управления. Метод базируется на итерировании фундаментальной области вдоль устойчивого подпространства собственных векторов матрицы Якоби, вычисленной в седловой неподвижной точке.

Основу метода составляет оригинальный подход нахождения обратной функции, сущность которого состоит в сведении задачи к решению нелинейного уравнения первого порядка. Такой подход исключает необходимость численного решения систем нелинейных уравнений и преодоления сопутствующих при этом вычислительных проблем.

Приведены примеры исследования глобальной динамики кусочно-гладких отображений с мультистабильным поведением.

Список литературы

1. Feudel U. Complex dynamics in multistable systems // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2008; 18(6): 1607–1626. <https://doi.org/10.1142/S0218127408021233>
2. Feudel U., Pisarchik A., Showalter K. Multistability and tipping: From mathematics and physics to climate and brain – Minireview and preface to the focus issue // *Chaos*. 2018. №28(3). 033501 p. <https://doi.org/10.1063/1.5027718>
3. Pisarchik A., Feudel, U. Control of multistability // *Phys. Rep.* 2014. №540(4). P. 167–218. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.02.007>
4. Hens C., Dana S., Feudel U. Extreme multistability: Attractor manipulation and robustness // *Chaos*. 2015. № 25(10). P. 053112. <https://doi.org/10.1063/1.4921351>
5. Prengel F., Wacker A., Schöoll E. Simple model for multistability and domain formation in semiconductor superlattices // *Phys. Rev.* 1994. № 50. P. 1705–1712. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.1705>
6. Liu Y., Chavez J. P. Controlling coexisting attractors of an impacting system via linear augmentation // *Physica D*. 2017. № 348. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2017.02.018>
7. Marmillot P., Kaufman M., Hervagault J-F. Multiple steady states and dissipative structures in a circular and linear array of three cells: Numerical and experimental approaches // *J. Chem. Phys.* 1991. № 95(2). P. 1206–1214. <https://doi.org/10.1063/1.461151>
8. Kuznetsov Y. *Elements of Applied Bifurcation Theory*, 3rd edition. Springer-Verlag, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3978-7>
9. *Chaotic Dynamics in Two-Dimensional Noninvertible Maps* / C. Mira, L. Gardini, A. Barugola, J.C. Cathala // World Scientific Publishing, Singapore. 1996. 632 p. <https://doi.org/10.1142/2252>

10. On some properties of invariant sets of two-dimensional noninvertible maps / C. E. Frouzakis, L. Gardini, I. G. Kevrekidis, G. Millerioux, C. Mira // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1997. № 7(06). P. 1167–1194. <https://doi.org/10.1142/S0218127497000613>
11. Parker T. S., Chua L. O. *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*. Springer-Verlag, New York, 1989. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9>
12. Nusse H. E., Yorke J. A. A procedure for finding numerical trajectories in chaotic saddles // *Physica D*. 1989. № 36(1-2). P. 137–156. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90253-4](https://doi.org/10.1016/0167-2789(89)90253-4)
13. You Z., Kostelich E. J., Yorke J. A. Calculating stable and unstable manifolds // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1991. № 01(03). P. 605–623. <https://doi.org/10.1142/S0218127491000440>
14. England J.P., Krauskopf B., Osinga H.M. Computing one-dimensional stable manifolds and stable sets of planar maps without the inverse // *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.* 2004. №3(2). P. 161–190. <https://doi.org/10.1137/030600131>
15. A survey of methods for computing (un)stable manifolds of vector fields / B. Krauskopf, H.M. Osinga, E.J. Doedel, M.E. Henderson, J. Guckenheimer, A. Vladimirovsky, M. Dellnitz, O. Junge // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2005. № 15(03). P. 763–791. <https://doi.org/10.1142/S0218127405012533>
16. Funderling D. Toward the calculation of higher-dimensional stable manifolds and stable sets for noninvertible and piecewise-smooth maps // *J. Nonlinear Sci.* 2008. № 18. P. 391–413. <https://doi.org/10.1007/s00332-007-9016-4>
17. Li H., Fan Y., Zhang J. A new algorithm for computing one-dimensional stable and unstable manifolds of maps // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. Vol. 2012. № 22(01). P. 1250018. <https://doi.org/10.1142/S0218127412500186>
18. Invariant manifolds and global bifurcations / J. Guckenheimer, B. Krauskopf, H. M. Osinga, B. B. Sandstede // *Chaos*. 2015. № 25(9). P. 097604. <https://doi.org/10.1063/1.4915528>
19. Yue X-L., Xu Y., Xu W., Sun J-Q. Global Invariant manifolds of dynamical systems with the compatible cell mapping method // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2019. № 29(8). P. 1950105. <https://doi.org/10.1142/S0218127419501050>
20. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2008. № 237(7). P. 930-936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
21. Simpson D.J.W. The structure of mode-locking regions of piecewise-linear continuous maps: I. Nearby mode-locking regions and shrinking points // *Nonlinearity*. 2016. № 30(1). P. 382–444. <https://doi.org/10.1088/1361-6544/aa4f49>
22. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. *Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems*. World Scientific, Singapore, 2003.

23. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Direct transition from a stable equilibrium to quasiperiodicity in non-smooth systems // *Physics Letters A*. 2008. № 372(13). P. 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.077>
24. Baushev V. S., Zhusubaliyev Zh. T. Indeterminable states of a voltage regulator with pulse-width control // *Elect. Techn.* 1992. № 3. P. 85-98.
25. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., De S., Banerjee S. Transitions from phase-locked dynamics to chaos in a piecewise-linear map // *Physical Review E*. 2008. № 77. P. 026206. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.026206>
26. De S., Dutta P.S., Banerjee S. Torus destruction in a nonsmooth noninvertible map // *Physics Letters A*. 2012. № 376. P. 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.11.017>
27. Avrutin V., Zhusubaliyev Zh. T. Nested closed invariant curves in piecewise smooth maps // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 2019. № 29(7). P. 1930017. <https://doi.org/10.1142/S0218127419300179>

References

1. Feudel U. Complex dynamics in multistable systems. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2008, no. 18(6), pp. 1607–1626. <https://doi.org/10.1142/S0218127408021233>
2. Feudel U., Pisarchik A., Showalter K. Multistability and tipping: From mathematics and physics to climate and brain – Minireview and preface to the focus issue. *Chaos*, 2018, no. 28(3), 033501 p. <https://doi.org/10.1063/1.5027718>
3. Pisarchik A., Feudel U. Control of multistability. *Phys. Rep.*, 2014, no. 540(4), pp. 167–218. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.02.007>
4. Hens C., Dana S., Feudel U. Extreme multistability: Attractor manipulation and robustness. *Chaos*, 2015, no. 25(10), pp. 053112. <https://doi.org/10.1063/1.4921351>
5. Pregel F., Wacker A., Schöoll E. Simple model for multistability and domain formation in semiconductor superlattices. *Phys. Rev.*, 1994, no. 50, pp. 1705–1712. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.1705>
6. Liu Y., Chavez J. P. Controlling coexisting attractors of an impacting system via linear augmentation. *Physica D.*, 2017, no. 348, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2017.02.018>
7. Marmillot P., Kaufman M., Hervagault J-F. Multiple steady states and dissipative structures in a circular and linear array of three cells: Numerical and experimental approaches. *J. Chem. Phys.*, 1991, no. 95(2), pp. 1206–1214. <https://doi.org/10.1063/1.461151>
8. Kuznetsov Y. *Elements of Applied Bifurcation Theory*, 3rd edition. Springer-Verlag, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3978-7>
9. Mira C., Gardini L., Barugola A., Cathala J.C. *Chaotic Dynamics in Two-Dimensional Noninvertible Maps*. World Scientific Publishing, Singapore, 1996, 632 p. <https://doi.org/10.1142/2252>

10. Frouzakis C. E., Gardini L., Kevrekidis I. G., Millerioux G., Mira C. On some properties of invariant sets of two-dimensional noninvertible maps. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 1997, no. 7(06), pp. 1167–1194. <https://doi.org/10.1142/S0218127497000613>
11. Parker T. S., Chua L. O. Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems. Springer-Verlag, New York, 1989. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9>
12. Nusse H. E., Yorke J. A. A procedure for finding numerical trajectories in chaotic saddles. *Physica D*, 1989, no. 36(1-2), pp. 137–156. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90253-4](https://doi.org/10.1016/0167-2789(89)90253-4)
13. You Z., Kostelich E. J., Yorke J. A. Calculating stable and unstable manifolds. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 1991, no. 01(03), pp. 605–623. <https://doi.org/10.1142/S0218127491000440>
14. England J.P., Krauskopf B., Osinga H.M. Computing one-dimensional stable manifolds and stable sets of planar maps without the inverse. *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.*, 2004, no. 3(2), p. 161–190. <https://doi.org/10.1137/030600131>
15. Krauskopf B., Osinga H.M., Doedel E.J., Henderson M.E., Guckenheimer J., Vladimirsky A., Dellnitz M., Junge O. A survey of methods for computing (un)stable manifolds of vector fields. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2005, no. 15(03), pp. 763–791. <https://doi.org/10.1142/S0218127405012533>
16. Funding D. Toward the calculation of higher-dimensional stable manifolds and stable sets for noninvertible and piecewise-smooth maps. *J. Nonlinear Sci.*, 2008, no. 18, pp. 391–413. <https://doi.org/10.1007/s00332-007-9016-4>
17. Li. H., Fan Y., Zhang J. A new algorithm for computing one-dimensional stable and unstable manifolds of maps. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2012, no. 22(01), 1250018 p. <https://doi.org/10.1142/S0218127412500186>
18. Guckenheimer J., Krauskopf B., Osinga H. M., B. Sandstede B. Invariant manifolds and global bifurcations. *Chaos*, 2015, no. 25(9), 097604 p. <https://doi.org/10.1063/1.4915528>
19. Yue X-L., Xu Y., Xu W., Sun J-Q. Global Invariant manifolds of dynamical systems with the compatible cell mapping method. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2019, no. 29(8), 1950105 p. <https://doi.org/10.1142/S0218127419501050>
20. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. World Scientific, Singapore, 2003.
21. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2008, no. 237(7), pp. 930-936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
22. Simpson D.J.W. The structure of mode-locking regions of piecewise-linear continuous maps: I. Nearby mode-locking regions and shrinking points. *Nonlinearity*, 2016, no. 30(1), pp. 382–444. <https://doi.org/10.1088/1361-6544/aa4f49>

23. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Direct transition from a stable equilibrium to quasiperiodicity in non-smooth systems. *Physics Letters A*, 2008, no. 372(13), pp. 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.077>
24. Baushev V. S., Zhusubaliyev Zh. T. Indeterminable states of a voltage regulator with pulse-width control. *Elect. Techn.*, 1992, no. 3, pp. 85-98.
25. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., De S., Banerjee S. Transitions from phase-locked dynamics to chaos in a piecewise-linear map. *Physical Review E*, 2008, no. 77, 026206 p. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.026206>
26. De S., Dutta P.S., Banerjee S. Torus destruction in a nonsmooth noninvertible map. *Physics Letters A*, 2012, no. 376, pp. 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.11.017>
27. Avrutin V., Zhusubaliyev Zh. T. Nested closed invariant curves in piecewise smooth maps. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2019, no. 29(7), 1930017 p. <https://doi.org/10.1142/S0218127419300179>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhanybai@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5534-9902>

Zhanybai T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhanybai@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5534-9902>

Рубанов Василий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, завкафедрой технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: vgrubanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1795-2708>

Vasiliy G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Engineering Cybernetics, Belgorod State Technological University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: vgrubanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1795-2708>

Гольцов Юрий Александрович, старший преподаватель кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: uagoltsov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6065-8985>

Yuriy A. Gol'tsov, Senior Lecturer, Department of Engineering Cybernetics, Belgorod State Technological University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: uagoltsov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6065-8985>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-183-195>

Фильтрация сигнала в нечетком фильтре на основе метода отношения площадей

М. В. Бобырь¹ ✉, М. Ю. Лунев¹

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Цифровая фильтрация сигнала позволяет в режиме реального времени сглаживать шумы, возникающие в электронных устройствах. В настоящее время существует множество различных цифровых фильтров, отличающихся быстродействием, затратами вычислительных мощностей, алгоритмами и ограничениями по условиям использования. Одним из таких фильтров является фильтр Калмана, однако настройка коэффициентов усиления данного фильтра весьма усложнена процессом дополнительных экспериментов и сбором статистической информации. Поэтому в данной работе авторы рассматривают упрощенный алгоритм нахождения коэффициентов регулирования нечеткого цифрового фильтра с дефаззификатором на основе метода отношения площадей и исследуют влияние параметров метода отношения площадей на фильтрацию сигнала, тем самым достигая цель – повышение точности работы нечеткого цифрового фильтра.

Методы. Для алгоритма нахождения коэффициентов регулирования цифрового фильтра использовался аппарат нечеткой логики. Коэффициенты регулирования определяются с помощью дефаззификатора на основе метода отношения площадей.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований проводился расчет среднеквадратической ошибки RMSE для нечеткого цифрового фильтра с использованием метода отношения площадей, метода центра тяжести и фильтра Калмана. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что у нечеткого фильтра на основе метода отношения площадей RMSE в 5,43 раза меньше чем для фильтра Калмана и в 2,77 раза меньше чем для дефаззификатора на основе метода центра тяжести. Полученные результаты доказывают эффективность использования нечеткого цифрового фильтра с методом отношения площадей.

Заключение. В данной статье рассмотрен алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра, проведено моделирование нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана в системе Simulink, рассчитаны значения RMSE для нечеткого цифрового фильтра с методом отношения площадей и методом центра тяжести, а так же фильтра Калмана.

Ключевые слова: нечеткий цифровой фильтр; фильтр Калмана; дефаззификация; коэффициент фильтрации; метод отношения площадей.

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

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

Для цитирования: Бобырь М. В., Лунева М. Ю. Фильтрация сигнала в нечетком фильтре на основе метода отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 183-195. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-183-195>.

Поступила в редакцию 09.04.2020

Подписана в печать 27.04.2020

Опубликована 30.06.2020

Filtering a Signal in a Fuzzy Filter Based on the Area Ratio Method

Maksim V. Bobyr¹ ✉, Marina Yu. Luneva¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. Digital signal filtering allows real-time noise reduction in electronic devices. Currently, there are many different digital filters, differing in speed, computing power, algorithms and restrictions on the conditions of use. One of these filters is the Kalman filter, but adjusting the gains of this filter is very complicated by the process of additional experiments and collection of statistical information. Therefore, in this paper, the authors consider a simplified algorithm for finding the control coefficients of a fuzzy digital filter with defuzzifier based on the area ratio method and investigate the influence of the area ratio method parameters on signal filtering, thereby achieving the goal of improving the accuracy of the fuzzy digital filter.

Methods. For the algorithm for finding the control coefficients of the digital filter, a fuzzy logic apparatus was used. The control factors are determined using a defuzzifier based on the area ratio method.

Results. In the course of experimental studies, the mean square error RMSE was calculated for a fuzzy digital filter using the area ratio method, the center of gravity method and the Kalman filter. Based on the results obtained, it was concluded that the fuzzy filter based on the area ratio RMSE method is 5.43 times less than for the Kalman filter and 2.77 times less than for the defuzzifier based on the center of gravity method. The results obtained prove the effectiveness of using a fuzzy digital filter with the area ratio method.

Conclusion: This article considers an algorithm for the operation of a fuzzy digital filter, simulates a fuzzy digital filter and a Kalman filter in the Simulink system and calculates the RMSE values for a fuzzy digital filter with the area ratio method and the center of gravity method, as well as the Kalman filter.

Keywords: fuzzy digital filter; Kalman filter; defuzzification; filtration coefficient; area ratio method.

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

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment GZ No. 0851-2020-0032.

For citation: Bobyr M. V., Luneva M. Yu. Filtering a Signal in a Fuzzy Filter Based on the Area Ratio Method // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 183-195 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-183-195>.

Received 09.04.2020

Accepted 27.04.2020

Published 30.06.2020

Введение

В настоящее время цифровая обработка сигналов имеет широкое применение практически во всех отраслях науки и техники. Системы цифровой обработки сигналов являются неотъемлемой частью следующих областей: телекоммуникация, системы обработки изображений, звукозапись, мобильная связь, различная медицинская аппаратура [1]. Существует много различных фильтров, отличающихся быстродействием, затратами вычислительных мощностей, алгоритмами и ограничениями по условиям использования. Одним из таких фильтров является фильтр Калмана, который применяется для разного рода задач. Например, в исследовании [2] был разработан новый интерфейс человек-манипулятор, который оценивает положение и ориентацию человеческой руки с помощью 3D-камеры и инерциального измерительного устройства (IMU). Здесь используется многочастичный фильтр и фильтр Калмана для оценки ориентации и положения руки человека, и фильтр конечной импульсной характеристики для обнаружения сбоев многочастичного фильтра. В работе [3] используется адаптивный фильтр Калмана для самоадаптации длины дуги и повышения точности процесса газовой вольфрамовой дуговой сварки. Для повышения качества фильтрации оптимальным является использование нейросетевых и традиционных технологий [4-5]. Во многих исследованиях фильтр

Калмана применяется с нечеткой логикой. Например, в работе [6] предлагается нечеткий дополнительный фильтр Калмана для оценки положения беспилотного летательного аппарата. Для управления и навигации автономным подводным аппаратом в работе [7] предлагается использовать нечеткий фильтр Калмана и ансамблевый фильтр Калмана. Однако для оптимальной работы фильтра Калмана требуется точный подбор коэффициентов усиления фильтра. Подбор коэффициентов вызывает сложность, поскольку необходимо провести ряд экспериментов, связанных с предсказанием состояния системы на определенном шаге и определить статистические переменные, что требует дополнительного времени. При этом в работах [8-10] авторы разработали цифровой фильтр, который с помощью нечеткой логики позволяет определить коэффициенты регулирования фильтра. Данная работа является продолжением работы [10]. Авторы описывают алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра с дефазификатором на основе метода отношения площадей и исследуют влияние параметров, представленного метода на фильтрацию сигнала.

Материалы и методы

Поставим задачу повышения точности работы нечеткого цифрового фильтра. Для этого был разработан алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра, представленный на рис. 1 [11].

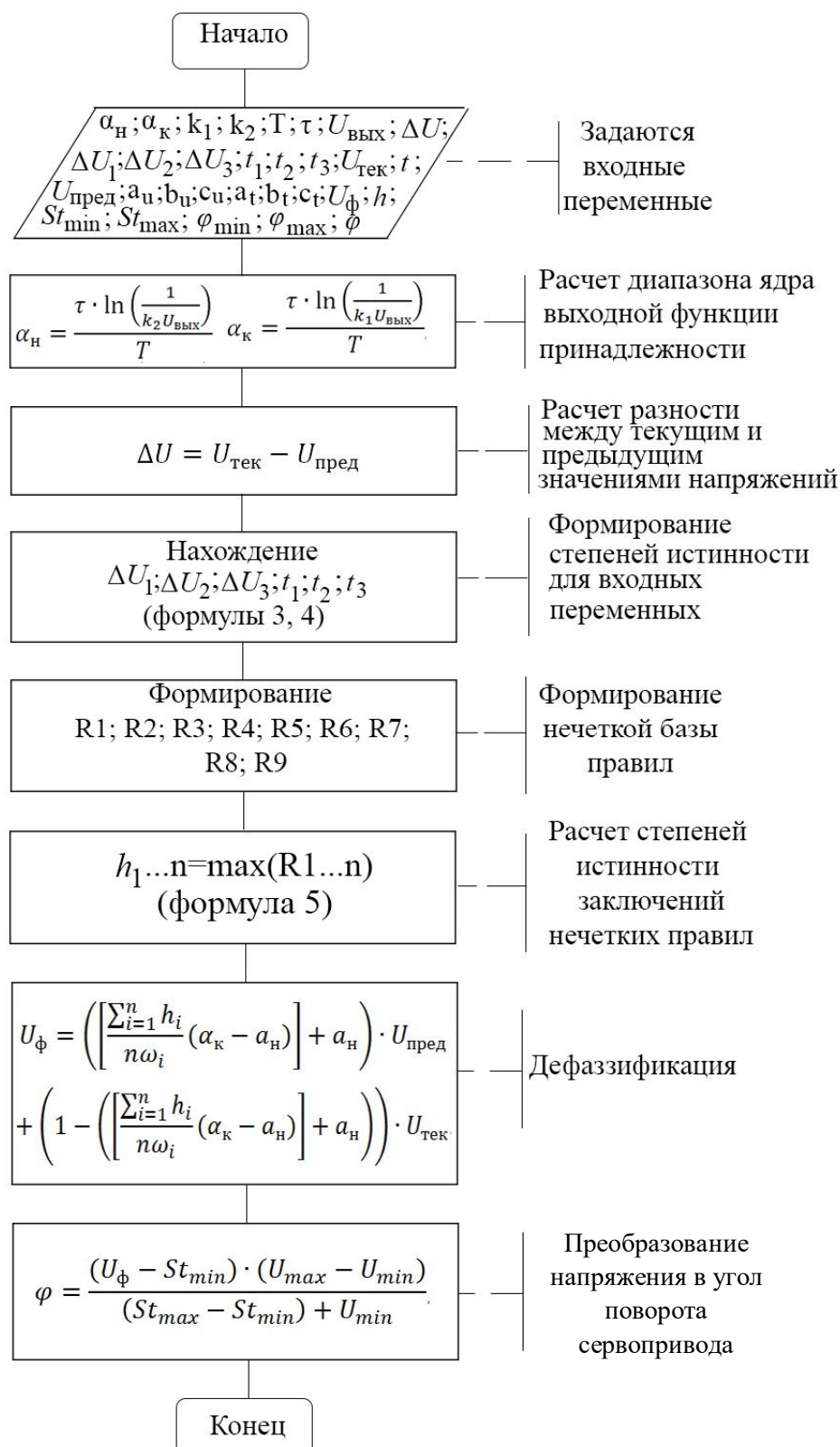


Рис. 1. Алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра

Fig. 1. Fuzzy digital filter operation algorithm

Для определения параметров нечеткого фильтра необходимо сделать следующую последовательность действий.

1. Расчет диапазона ядра выходной функции принадлежности

$$\alpha_n = \frac{\tau \cdot \ln\left(\frac{1}{k_2 U_{\text{ВЫХ}}}\right)}{T}; \quad \alpha_k = \frac{\tau \cdot \ln\left(\frac{1}{k_1 U_{\text{ВЫХ}}}\right)}{T}, \quad (1)$$

где T – период следования импульса; τ – период единичного импульса; $U_{\text{ВЫХ}}$ –

максимальный выходной сигнал на выходе микроконтроллера ($U_{\text{ВЫХ}} = 5\text{В}$); k_1 – коэффициент, учитывающий минимальную точность фильтра (5%); k_2 – коэффициент, учитывающий максимальную точность фильтра (0,01%). На рис. 2 приведен график выходной функции принадлежности, на котором показан диапазон значений α_n и α_k , определяющихся по формуле (1).

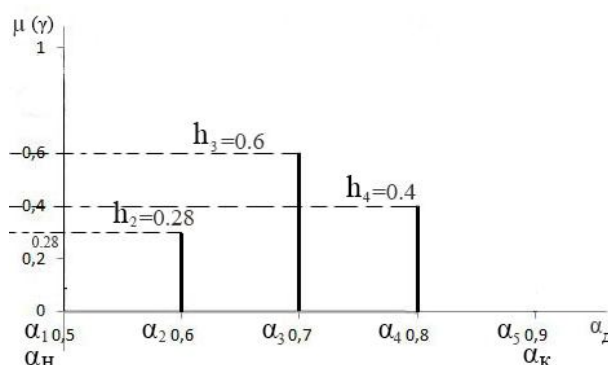


Рис. 2. График выходной функции принадлежности

Fig. 2. Output membership function graph

2. Построение входных функций принадлежности нечеткого фильтра. Первая входная переменная ΔU_p – разница между текущим $U_{\text{тек}}$ и предыдущим $U_{\text{пред}}$ значениями напряжения, полученного от потенциометра. ΔU_p определяется по формуле [10–12]:

$$\Delta U = U_{\text{тек}} - U_{\text{пред}}, \quad (2)$$

Первая входная переменная состоит из трех термов $\Delta U_{p1} = (\Delta U_1, \Delta U_2, U_3)$, которые определяются по формуле:

$$\Delta U_1 = \begin{cases} \frac{b_u - \Delta U}{b_u - a_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U \leq b_u; \\ 0, & \text{если } 0 < \Delta U < a_u. \end{cases}$$

$$\Delta U_2 = \begin{cases} \frac{\Delta U - a_u}{b_u - a_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U \leq b_u; \\ \frac{c_u - \Delta U}{c_u - b_u}, & \text{если } b_u \leq \Delta U \leq c_u. \end{cases}$$

$$\Delta U_3 = \begin{cases} \frac{\Delta U - b_u}{c_u - b_u}, & b_u \leq \Delta U \leq c_u; \\ 0, & \text{если } a_u < \Delta U < b_u. \end{cases} \quad (3)$$

Вторая входная переменная – время поворота звеньев робота-манипулятора из минимального положения в максимальное t . Вторая входная переменная состоит из трех термов $t = (t_1, t_2, t_3)$, определяющихся по формуле:

$$t_1 = \begin{cases} \frac{b_t - t}{b_t - a_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ 0, & \text{если } 0 < \Delta U < a_t. \end{cases}$$

$$t_2 = \begin{cases} \frac{t-a_t}{b_t-a_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ \frac{c_t-t}{c_t-b_t}, & \text{если } b_t \leq t \leq c_t. \end{cases} \quad (4)$$

$$t_3 = \begin{cases} \frac{t-b_t}{c_t-b_t}, & b_t \leq t \leq c_t; \\ 0, & \text{если } a_t < \Delta U < b_t. \end{cases}$$

3. Определение базы правил для управления нечеткого цифрового фильтра [13-14].

R1: Если « $\Delta U = \Delta U_1$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_5$ »;
 R2: Если « $\Delta U = \Delta U_1$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_4$ »;
 R3: Если « $\Delta U = \Delta U_1$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;
 R4: Если « $\Delta U = \Delta U_2$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_4$ »;
 R5: Если « $\Delta U = \Delta U_2$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;
 R6: Если « $\Delta U = \Delta U_2$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_2$ »;
 R7: Если « $\Delta U = \Delta U_3$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;
 R8: Если « $\Delta U = \Delta U_3$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_2$ »;
 R9: Если « $\Delta U = \Delta U_3$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_1$ ».

4. Расчет степеней истинности заключений нечетких правил по формуле:

$$\begin{aligned} h_1 &= \min(\Delta U_1; t_1) \\ h_2 &= \max(\min(\Delta U_2; t_1); \min(\Delta U_1; t_2)); \quad (5) \\ h_3 &= \max(\min(\Delta U_3; t_1); \min(\Delta U_2; t_2) \\ &\quad \min(\Delta U_1; t_3)); \\ h_4 &= \max(\min(\Delta U_3; t_2); \min(\Delta U_2; t_3)); \\ h_5 &= \min(\Delta U_3; t_3). \end{aligned}$$

5. Дефаззификация – расчет четкого значения коэффициента нечеткого цифрового фильтра α по формуле (6) [15]. Дефаззификация осуществлялась на основе линейного метода отношения площадей [16]. Подробно данный метод рассмотрен в работах [17-18].

$$\begin{aligned} U_\phi &= \left(\left[\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n \omega_i} (\alpha_k - a_n) \right] + a_n \right) \cdot U_{\text{пред}} + \\ &+ \left(1 - \left(\left[\frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n \omega_i} (\alpha_k - a_n) \right] + a_n \right) \right) \cdot U_{\text{тек}}. \quad (6) \end{aligned}$$

6. Преобразование, полученного напряжения в угол поворота, передаваемого от микроконтроллера на сервоприводы, по формуле:

$$\varphi = \frac{(U_\phi - St_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_{\min})}{(St_{\max} - St_{\min}) + U_{\min}}, \quad (7)$$

где $St_{\min}$, $St_{\max}$ – минимальное и максимальное значения выходного напряжения 0 и 1024, зависит от разрядности аналого-цифрового преобразователя; $\varphi_{\max}$ и $\varphi_{\min}$ – максимальное и минимальное значения угла поворота звеньев робота-манипулятора.

Поскольку экспериментальная модель робота-манипулятора имеет четыре звена (левое и правое плечи, платформа основания и захват), то формулы для преобразования напряжения в угол поворота сервопривода для каждого из его звеньев с учетом уравнения (7) будут иметь следующий вид:

– формула для захвата робота-манипулятора

$$\varphi_3 = \varphi_{\min} + \frac{U_\phi \cdot (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}{St_{\max}}, \quad (8)$$

$$\varphi_3 = 105 + U_\phi \cdot 0.034.$$

– формулы для левого и правого плеч робота-манипулятора

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{лп}} = \varphi_{\text{пп}} &= \frac{U_\phi \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}}, \\ \varphi_{\text{лп}} = \varphi_{\text{пп}} &= U_\phi \cdot 0.137. \end{aligned} \quad (9)$$

– формулы для платформы основания робота-манипулятора

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \frac{U_\phi \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}}, \\ \varphi_0 &= U_\phi \cdot 0.176. \end{aligned} \quad (10)$$

В следующем разделе рассмотрим моделирование работы нечеткого фильтра.

Результаты и их обсуждение

Во время экспериментальных исследований, проводилось моделирование

нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана в среде Simulink. На рис. 3 представлена схема разработанной модели [19-20].

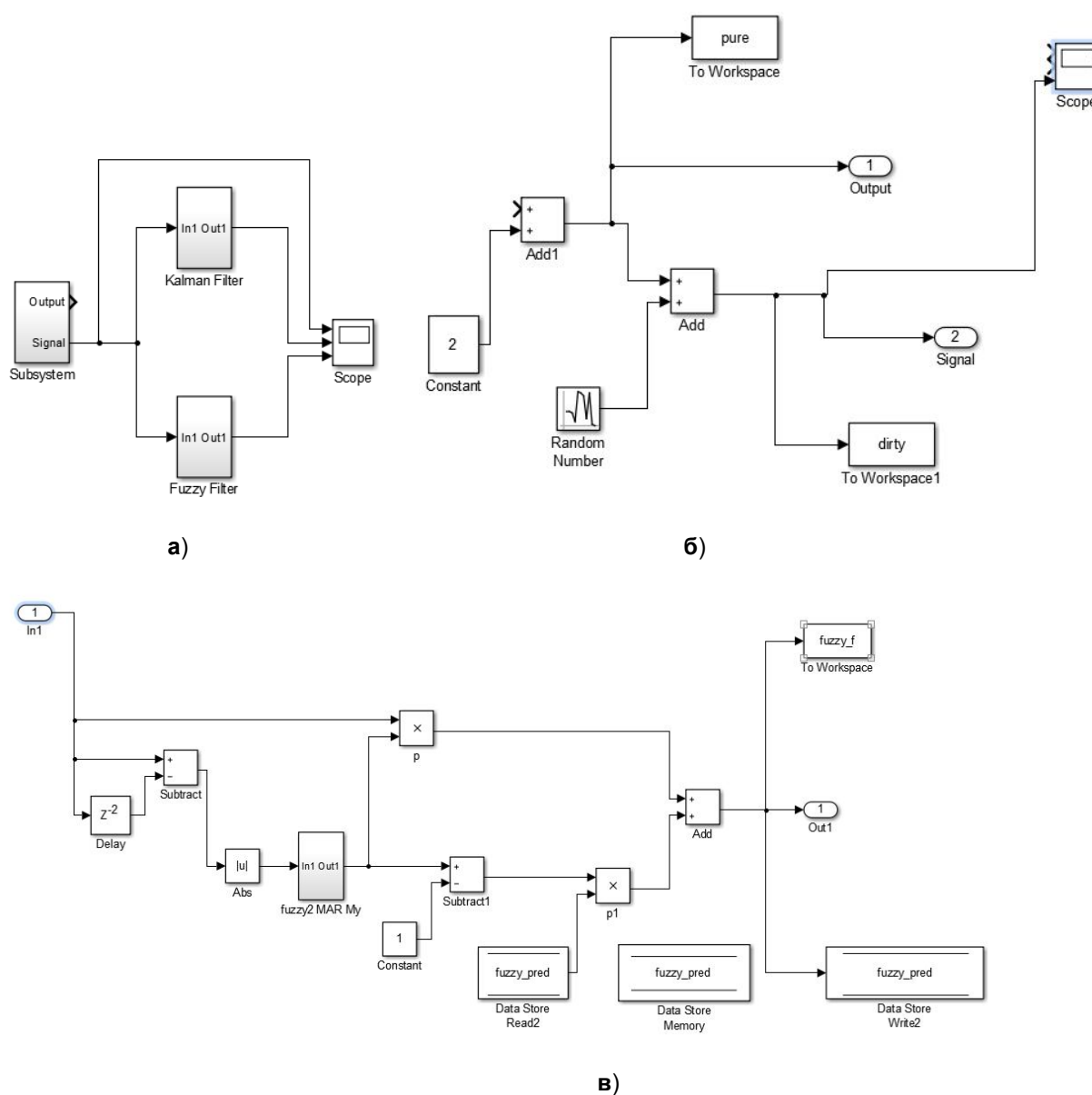


Рис. 3. Схема разработанной модели: **а** – общая схема; **б** – структура блока «Subsystem»; **в** – структура нечеткого цифрового фильтра

Fig. 3. Scheme of the developed model: **a** – general scheme; **b** – the structure of the "Subsystem" block; **v** – structure of a fuzzy digital filter

Блок «fuzzy2 MAR My» реализует дефазификацию на основе линейного метода отношения площадей (формула (6)).

Оценка работы нечеткого фильтра осуществлялась с помощью параметра RMSE (Root Mean Square Error), который определялся по формуле:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=m}^1 (\bar{y}_i - y_i)^2}, \quad (11)$$

где m – количество измерений в выборке;
 $\bar{y}_i$ – значение идеального входного значения на данной итерации; y_i – выходное значение системы на данной итерации.

Расчет RMSE проводился для метода центра тяжести (МЦТ), фильтра

Калмана (ФК) и метода отношения площадей (МОП) при различных значениях весового коэффициента ω . Данные сведены в табл. 1.

На рис. 4 представлены результаты моделирования нечеткого фильтра и фильтра Калмана с постоянным сигналом с шумом.

Таблица 1. Сравнение значений параметра RMSE при варьировании параметра ω

Table 1. Comparison of the RMSE parameter values when the parameter ω

ω	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3
RMSE МОП	0.0096	0.0092	0.0089	0.0085	0.0082	0.0079	0.0076	0.0073	0.0070
RMSE ФК	0.0261								
RMSE МЦТ	0.0133								
ω	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2
RMSE МОП	0.0067	0.0065	0.0064	0.0063	0.0062	0.0060	0.0055	0.0051	0.0050
RMSE ФК	0.0261								
RMSE МЦТ	0.0133								
ω	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	
RMSE МОП	0.0049	0.0049	0.0048	0.0049	0.0052	0.0060	0.0078	0.0150	
RMSE ФК	0.0261								
RMSE МЦТ	0.0133								

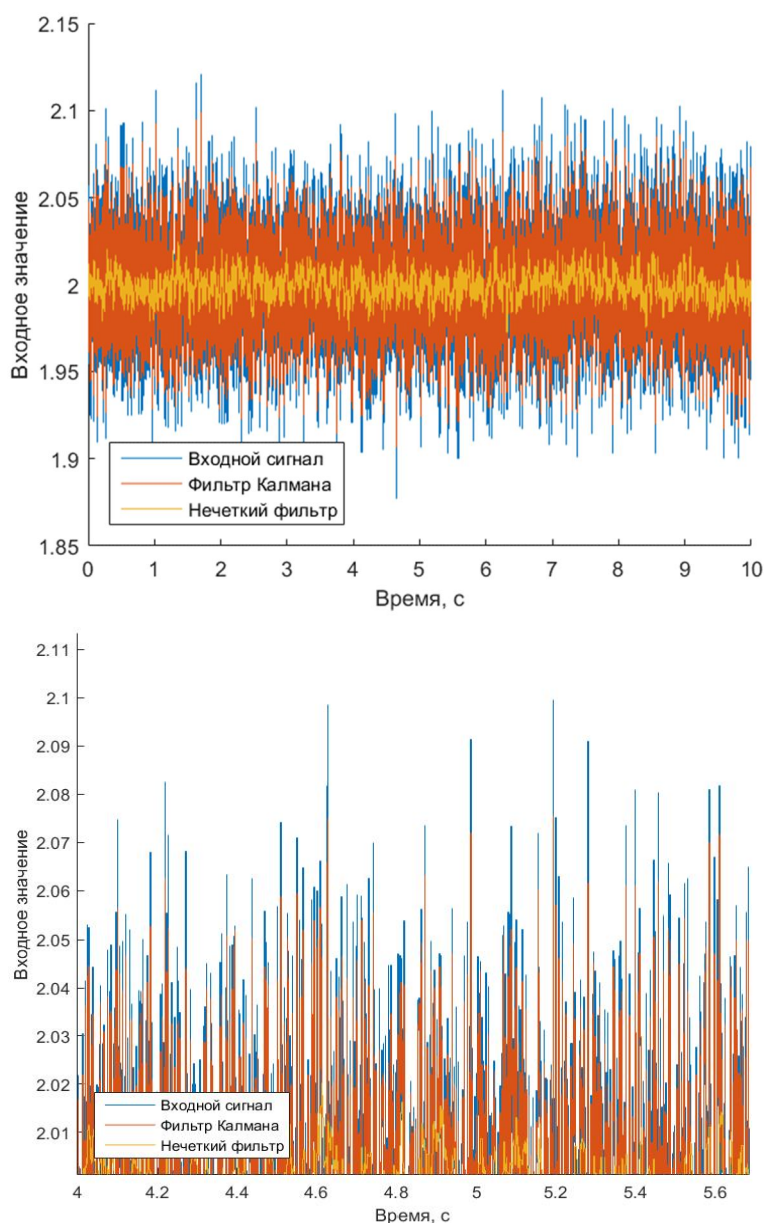


Рис. 4. Результат моделирования фильтра Калмана и нечеткого фильтра с постоянным сигналом с шумом

Fig. 4. Simulation result of Kalman filter and fuzzy filter with constant signal with noise

Выводы

На основании полученных результатов были сделаны выводы:

1. Установлено, что точность нечеткого фильтра на основе оценки параметра RMSE зависит от весового коэффициента ω и имеет нелинейную характеристику.

2. Среднеквадратическая ошибка RMSE минимальная при дефаззификации на основе метода отношения площадей. Таким образом, RMSE дефаззификации с методом отношения площадей в 5,43 раза меньше RMSE чем для фильтра Калмана и в 2,77 раза меньше чем для дефаззификатора на основе метода центра тяжести (табл. 1).

3. Наилучшее значение весового коэффициента ω при котором средне-квадратическая ошибка RMSE минимальна составляет 4,5 единиц.

4. Использование нечеткого цифрового фильтра сглаживает шумы в электронных устройствах.

В данной статье представлен алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра с подробным описанием каждого из этапов алгоритма. Проведено моделирование нечеткого цифрового фильтра

и фильтра Калмана в системе Simulink. Рассчитаны значения RMSE для нечеткого цифрового фильтра с методом отношения площадей и методом центра тяжести, а так же фильтра Калмана. На основании полученных значений был проведен анализ и сделаны выводы об эффективности использования нечеткого цифрового фильтра с дефазификатором, основанном на методе отношения площадей.

Список литературы

1. Практическое руководство по цифровой обработке сигналов: цифровые фильтры и обработка ЭКГ сигналов / С.Н. Торгаев, И.А. Лежнина, И.Д. Шульга, Е.А. Юрченко, М.В. Тригуб. Томск. 2020. 112 с.
2. Du G., Zhang P., Novel A. Human–Manipulators Interface Using Hybrid Sensors With Kalman Filter and Particle Filter // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016. №38. P. 93-101.
3. Arc Length Stable Method of GTAW Based on Adaptive Kalman Filter / H. Wanga, T. Lei, Y. Ronga, W. Shaoa, Y. Huang // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. P. 1-9. (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.029>.
4. Амосов О.С. Фильтрация марковских последовательностей на основе байесовского, нейросетевого подходов и систем нечеткой логики при обработке навигационной информации // *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2004. № 4. С. 61–69.
5. Елисеев А.В., Музыченко Н.Ю. Метод адаптивной настройки фильтра Калмана в задаче слежения за динамическим объектом с неизвестным ускорением // *Радиотехника*. 2014. №8 С. 39-44.
6. Yanga Q., SunbL., A fuzzy Complementary Kalman Filter Based on Visual and IMU Data for UAV landing // *Optik*. 2018. №173. P. 279-291.
7. Ngatini, Apriliani E., Nurhadi H. Ensemble and Fuzzy Kalman Filter for Position Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle Based on Dynamical System of AUV Motion // *Expert Systems With Applications*. 2017. №68. P. 29-35.
8. Бобырь М.В., Лунева М.Ю., Ноливос К.С.А. Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором ARMino // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2019. Т. 40. №4. С. 244 – 250.
9. Бобырь М.В., Лунева М.Ю., Ноливос К.С.А. Алгоритм функционирования робота-манипулятора // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2018. №7. С. 34-40.

10. Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, В.А. Булатников, М.Ю. Лунева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 115-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>.
11. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №6. С. 21-26.
12. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. АСУ прогнозированием точностей обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008. №4. С. 3-4.
13. 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.
14. Бобырь М.В., Титов В.С., Милостная Н.А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний // Мехатроника, автоматизация и управление, 2014. №10. С. 8 – 14.
15. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas ratio // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 59. P. 19-32.
16. 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.
17. Анализ быстродействующих дефаззификаторов в задаче управления роботом-манипулятором / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, А.Е. Архипов, М.Ю. Лунева // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Vol.17. №4. P. 18-28.
18. Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15-26.
19. 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.
20. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Милостная Н.А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т.29. №2. С. 71-84.

References

1. Torgaev S.N., Lezhnina I.A., Shulga I.D., Yurchenko E.A., Trigub M.V. *Prakticheskoe rukovodstvo po tsifrovoi obrabotke signalov: tsifrovye fil'try i obrabotka EKG signalov* [A practical guide to digital signal processing: digital filters and ECG signal processing]. Tomsk, 2020. 112 p. (In Russ.).
2. Du G., Zhang P., Novel A. Human – Manipulators Interface Using Hybrid Sensors With Kalman Filter and Particle Filter. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, no. 38, pp. 93-101.

3. Wang H., Lei T., Rong Y., Shao W., Huang Y. Arc Length Stable Method of GTAW Based on Adaptive Kalman Filter. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, pp.1-9 (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.029>.

4. Amosov O.S. Fil'tratsiya markovskikh posledovatel'nostei na osnove baiesovskogo, neirosetevogo podkhodov i sistem nechetkoi logiki pri obrabotke navigatsionnoi informatsii [Filtration of Markov sequences based on Bayesian, neural network approaches and fuzzy logic systems in the processing of navigation information]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Izvestiya RAN. Theory and Control Systems*, 2004, no. 4, pp. 61–69 (In Russ.).

5. Eliseev A.V., Muzychenko N. Yu. Metod adaptivnoi nastroiки fil'tra Kalmana v zadache slezheniya za dinamicheskim ob"ektom s neizvestnym uskoreniem [The method of adaptive tuning of the Kalman filter in the problem of tracking a dynamic object with unknown acceleration]. *Radiotekhnika = Radiotekhnika*, 2014, no. 8, pp. 39-44 (In Russ.).

6. Yanga Q., Sunb L., A Fuzzy Complementary Kalman Filter Based on Visual and IMUD atafor UAV landing. *Optik*, 2018, no. 173, pp. 279-291.

7. Ngatini, Apriliani E., Nurhadi H. Ensemble and Fuzzy Kalman Filter for Position Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle Based on Dynamical System of AUV Motion. *Expert Systems With Applications*, 2017, no. 68, pp. 29-35.

8. Bobyr M.V., Luneva M.Yu., Nolivos K.S.A. Nechetkii tsifrovoy fil'tr dlya upravleniya robotom-manipulyatorom ARMinо [Fuzzy digital filter for controlling the ARMinо robot arm]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2019, vol. 40, no. 4, pp. 244 - 250 (In Russ.).

9. Bobyr M.V., Luneva M.Yu., Nolivos K.S.A. Algoritм funktsionirovaniya robota-manipulyatora [Algorithm of functioning of a robotic manipulator]. *Promyshlennyye ASU i kontroly = Industrial ACS and Controllers*, 2018, no. 7, pp. 34-40 (In Russ.).

10. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A, Luneva M. Yu. Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 115-129 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129> (In Russ.).

11. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Algoritм vysokoskorostnoi obrabotki detalei na osnove nechetkoi logiki [Algorithm for high-speed machining of parts based on fuzzy logic]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2012, no. 6, pp. 21-26 (In Russ.).

12. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei [ACS for predicting the accuracy of parts processing]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2008, no. 4, pp. 3-4 (In Russ.).

13. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Adaptivnyi mul'tisetevoi algo-ritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU [An adaptive multi-network fuzzy inference algorithm in problems of controlling equipment with

CNC]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2013, no. 5, pp. 18-23 (In Russ.).

14. Bobyr M.V., Titov V.S., Milostnaya N.A. Prognozirovanie raboty mekhatronnykh sistem na osnove myagkikh nechetkikh baz znaniy [Forecasting the operation of mechatronic systems based on soft fuzzy knowledge bases]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniya* = *Mechatronics, Automation and Control*, 2014, no. 10, pp. 8 - 14 (In Russ.).

15. 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.

16. 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, pp. 107378.

17. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Arkhipov A.E., Luneva M.Yu. Analiz bystrodeistvuyushchikh defazzifikatorov v zadache upravleniya robotom-manipulyatorom [Analysis of high-speed defuzzifiers in the problem of controlling a robotic manipulator]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = *Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2020, vol. 17, no.4, pp. 18-28 (In Russ.).

18. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neuro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadei [Teaching a neuro-fuzzy system based on the area difference method]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* = *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2016, no. 4, pp. 15-26 (In Russ.).

19. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, pp. 106030.

20. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Milostnaya N.A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [Method for calculating depth maps based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki* = *Systems and Means of Informatics*, 2019, vol.29, no. 2, pp. 71-84 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Лунева Марина Юрьевна, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: marinok-l@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5774-4487>

Marina Yu. Luneva, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: marinok-l@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5774-4487>