

120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 Hz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

11010010010010001010101011010101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)

0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)

100100011110011011110010100110111001100101000110101001100110010101100010100100101011110100110

0010100101100110010011001001110110011000100110010010101000011100110010011100010110100100100

0011010100110100100010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101

1101110011001010111100101010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

051010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА



ВЫСШАЯ АТТЕСТАЦИОННАЯ КОМИССИЯ (ВАК) при Министерстве образования и науки Российской Федерации



ULRICH'S KNOWLEDGEBASE



№ 4 Том 1 2021 № 4 Part 1 2021

Morskije intelektual'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
010100011011101001000100111011000010110011101010011101001100010101011010100100110011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
010001101100000110110110001010010011101001110011010011101001110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 том 1 2021 Сквозной номер 54

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление
О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

На страницах журнала публикуются **новые** научные разработки, результаты исследований, методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления.

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год. Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский. Статьям присваивается уникальный идентификатор DOI.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата, в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase.

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 12 000 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

Соответствие рубрик в научном журнале «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» номенклатуре научных специальностей ВАК, по которым присуждаются ученые степени

Отрасль науки, группа специальностей	по которым присуждается ученая степень
Кораблестроение	
Теория корабля и строительная механика	Технические
Проектирование и конструкция судов	Технические
Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства	Технические, экономические
Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)	Технические
Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие	Технические, Физико-математические
Информатика, вычислительная техника и управление	
Системный анализ, управление и обработка информации	Технические, Физико-математические
Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)	Технические
Управление в социальных и экономических системах	Технические
Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей	Технические, Физико-математические
Системы автоматизации проектирования	Технические, Физико-математические
Теоретические основы информатики	Технические, Физико-математические
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	Технические, Физико-математические

Рукописи и документы к статье представляются в редакцию в электронном виде (e-mail: mit-journal@mail.ru)

Учредитель-издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»).

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 от 19.09.2008 выданы Роскомнадзором.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

Адрес: 190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3.

Тел./факс +7 (812) 513-04-51, e-mail: mit-journal@mail.ru

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций.

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

<http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ». Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 1 2021 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

New scientific developments, research results, methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database (Emerging Sources Citation Index ESCI).

Frequency of publication - 4 issues per year.

In the journal the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.

The journal is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

The journal is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

Journal headings:

- Ship Building,
- Theory of Ship and Structures,
- Ship Designing and Structure,
- Technology of Ship Building,
- Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction); Information Science,
- Computer Engineering and Control System Analysis,
- Control and Processing of Information,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Control in Social and Economic Systems,
- Software for Computers,
- Complexes and Computer Networks,
- Designing Automation Systems,
- Foundations of Information Science,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures and Software Systems.

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index u and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: mit-journal@mail.ru)

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies".

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 of 19.09.2008 issued by Roskomnadzor.

Member of Association of science editors and publishers.

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies". Circulation of 100 copies.

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

<http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта РАН, Санкт-Петербург

А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

П.А. Шауб, д.т.н., профессор, Центр технологии судостроения и судоремонта, Санкт-Петербург

Члены Редколлегии

А.В. Алексеев, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Р.В. Борисов д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н., преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США

М.В. Войлошников, д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

А.Ш. Готман, д.т.н., профессор, Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург

Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Ф.Ф. Легуша, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В.В. Родионов, к.т.н, с.н.с., ЗАО «Си Проект», Санкт-Петербург

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет, Санкт-Петербург

Н.А. Тарануха, д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре

Ю.С. Федосенко, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

Редакционный Совет

Сопредседатели

И.Г. Захаров, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ЦМКБ «Алмаз», Санкт-Петербург

Г.А. Туричин, д.т.н., Ректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор, "ЦКБ "Лазурит", Нижний Новгород

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, генеральный директор, НИЦ "МОРИНТЕХ», Санкт-Петербург

И.Г. Малыгин, д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург

Г.Н. Муру, к.т.н., исполнительный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, Санкт-Петербург

Д.В. Никущенко, д.т.н., проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

С.П. Столяров, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

N.V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia
D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

A.I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

P.A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

R.V. Borisov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Yu.A. Vlasov, Cand. Sci. (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

M.V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

A.Sh. Gotman, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberia State University of water transport, Novosibirsk, Russia

A.N. Dyadik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

V.A. Evteev, Dr. Sci. (Eng.), United Shipbuilding Corporation, St. Petersburg, Russia

F.F. Legusha, Dr. Sci. (Phys. & Math.), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russia

Yu.I. Nechayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

V.V. Rodionov, Cand. Sci. (Eng), Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project", St. Petersburg, Russia

V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

N.A. Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Yu.S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

Editorial Board

Co-chairmen

I.G. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz", St. Petersburg, Russia

G.A. Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Council Members

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia

A.I. Gajkovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies", St. Petersburg, Russia

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), Executive Director, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

D.V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S.A. Ogai, Doctor of Engineering, Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

K.V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S.P. Stoljarov, Cand. Sci. (Eng), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
ВЫРАЖАЕТ ИСКРЕННЮЮ БЛАГОДАРНОСТЬ
РЕЦЕНЗЕНТАМ ЭТОГО НОМЕРА:**

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Александр Исаакович Фрумен**, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Николаевич Гордеев**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Валерий Иванович Трусов** доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Евгений Викторович Коротыцкий**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Абдурашид Яруллаевич Яфасов**, доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет
- **Алексей Игоревич Притыкин**, доктор технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет
- **Николай Николаевич Гордеев**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Виктор Михайлович Козин**, доктор технических наук, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Борис Федорович Дмитриев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Ильич Комашинский**, доктор технических наук, доцент, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко РАН
- **Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Анатолий Иванович Азовцев**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Виктор Иванович Гнатюк**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Галина Валентиновна Герман**, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
EXPRESSES SINCERE GRATITUDE
TO THE REVIEWERS OF THIS ISSUE:**

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexander I. Frumen**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dagestan State Technical University
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Nikolay N. Gordeev**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Valerii I Trusov**, Dr. Sci. (Eng.), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Evgenij V. Koroticskij**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Ivan B. Druz**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Abdurashid Y. Yafasov**, Dr. Sci. (Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Alexej I. Pritykin**, Dr.Sci.(Eng), Kaliningrad State Technical University
- **Nikolay N. Gordeev**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **Boris F. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir I. Komashinsky**, Dr.Sci.(Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Sergei V. Chekhranov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Alexandr A. Tarantsev**: Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Victor L. Martynov**: Dr.Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Anatoliy I. Azovtsev**, Dr.Sci. (Eng). Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy
- **Victor I. Gnatyuk**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad state technical university
- **Galina G. German**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexandr V. Kirichenko**, Dr.Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping



51 центральный конструкторско - технологический институт судоремонта

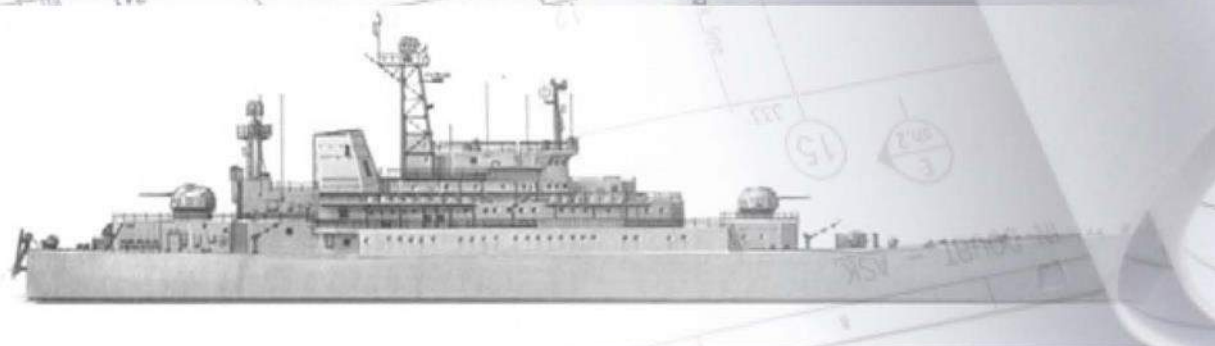
Санкт - Петербург
190021, Английская наб., д. 38
Тел./факс: +7 (812) 315-49-45
Email: office@51cktis.ru

Санкт - Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: +7 (812) 423-16-00

Решением Минобороны России на институт возложены функции проектанга по 137 проектам надводных кораблей и судов ВМФ иностранной постройки и кораблей, проектанты которых отсутствуют (ликвидированы).

Совместным Решением Минпромторга и Минобороны России институт назначен головной организацией по разработке ремонтной документации на надводные корабли и суда ВМФ.

Институт выполняет техническое освидетельствование и обследование кораблей, судов и прочих плавучих сооружений с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации; осуществляет разработку государственных военных стандартов ГОСТ РВ; обеспечивает исполнителей ГОЗ всеми видами документации на корабли (суда), их составные части и комплектующие изделия из фонда технической документации, содержащего 2 900 000 документов по 784 проектам.



СОДЕРЖАНИЕ	стр.
Памяти Ю. И. Нечаева.....	12
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Кныш Т.П., Сухотерин М.В., Барышников С.О. Изгиб панели обшивки корабля, нагруженной вдоль оси симметрии.....	14
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Никитин Н.В. Имитационная модель оценки безопасности водного транспорта.....	20
Грибов К.В., Федореев Г.А., Журенко А.Ю. Модельные исследования опытного образца малого многофункционального экраноплана.....	28
Корепанов А.Э. Влияние особенности компоновки корпуса тримарана на его гидродинамическое сопротивление.....	37
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Кузнецов Ю.П., Химич В.Л., Хрунков С.Н., Чуваков А.Б., Погодин Р.А. Тенденции и перспективы развития ручных шлифовальных пневматических машин.....	42
Рубан И.Н., Булгаков В.П., Федорова О.В. Анализ причин образования подбуртовых трещин втулки среднеоборотных двигателей внутреннего сгорания.....	48
Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Оценка технического состояния корпусов судов с использованием мобильных устройств магнитного типа.....	54
Башков О.В., Афанасьева А.А. Исследование структуры и фрикционных свойств нового композиционного фрикционного материала.....	59
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Матвеев В.Т., Дологлонян А.В., Очеретяный В.А. Управление характеристиками замкнутых газотурбинных установок пропульсивных комплексов подводных судов.....	66
Каракаев А.Б., Костенко А.В. Проверка адекватности полиномиальных зависимостей однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики.....	71
Каракаев А.Б., Костенко А.В. Разработка методики расчёта и проектирования однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики с использованием математической модели, полученной с помощью методов планирования эксперимента.....	79
Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Влияние вращающегося соплового аппарата на характеристики осевых малорасходных турбин.....	86
Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Выбор оптимальной проточной части и программы регулирования турбопривода автономного необитаемого подводного аппарата.....	90
Куценко Н.В., Грибиниченко М.В., Нитяговский А.В., Куренский А.В., Портнова О.С. Анализ результатов численного исследования радиального гибридного лепесткового подшипника с газовой смазкой.....	98
Герасиди В.В., Лисаченко А.В., Николаев Н.И., Слициан А.Е. Оценка теплового рассеивания элементов судовых технических средств морских судов.....	105
Стенин В.А., Ершова И.В., Жуков В.А. Моделирование тепловых процессов в футеровке судового котла.....	112
Егоркин В.С., Вялый И.Е., Изотов Н.В., Минаев А.Н., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Коррозионная стойкость в морских условиях алюминиевого сплава АМгЗ, обработанного короткоимпульсным плазменным электролитическим оксидированием.....	117
Соломахин Ю.В., Цыганкова Л.П., Коршунов В.Н. Распределение потерь кинетической энергии между сопловым аппаратом и рабочим колесом турбин на режимах частичного подвода газа.....	122

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Кобзаренко Д.Н. Анализ временных рядов – скоростей и направлений ветра с помощью моделей нейронных сетей и задачи классификации..... 127

Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Пышкина Н.Ю., Васильев Ю.И. Эффективность пространственно-рекурсивных алгоритмов передачи изображений морских судов..... 134

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Резцова А.М., Звягин П.Н. Анализ шума в модельном эксперименте по измерению ледовых нагрузок с использованием пробега по чистой воде..... 142

Михов О.М., Шаталова Н.В., Бородина О.В., Васильев Ю.И. Применение технологий машинного обучения для Drone Network в логистике и портовой деятельности России..... 149

Корнев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна..... 158

Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Котенко А.Г., Лукомская О.Ю., Шаталова Н.В., Бородина О.В. Разработка структурной схемы когнитивной транспортной системы..... 166

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Бурда Е.М., Перевезенцев С.В., Плющаев В.И. Комплексная автоматизация судовых технологических процессов колесных судов..... 175

Шрамко А.П. Оптимизация транспортно-технологических процессов методом динамического программирования..... 184

Черный С.П., Бузикаева А.В., Тимофеев А.К. Разработка интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебедки..... 195

Гордин С.А., Зайченко И.В., Хряпенко К.Д., Бажеряну В.В. Адаптивные системы управления судовыми тепловыми установками..... 201

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ботнарюк М.В., Ксензова Н.Н. Эконометрическая модель оценки взаимосвязей показателей эффективности деятельности стивидорной компании..... 206

Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б. Оптимальное управление ростом эффективности производственных предприятий..... 214

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Липко И.Ю. Моделирование редких событий качки беспилотного катамарана..... 219

Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Формирование и оптимизация издержек производственной рыбодобывающей деятельности судов..... 227

Недоступ А.А., Ражев А.О. Критерии мультифизического подбора тралового комплекса..... 232

Красильников Р.В., Жарова С.С. Математическое моделирование в процессе проектирования пусковых систем для морских робототехнических комплексов..... 238

Данцевич И.М. Адаптивное многослойное управление телеуправляемыми необитаемыми аппаратами..... 245

Жиляков П.В., Фатеев С.И. Ускорение работы подводной системы технического стереозрения с помощью многопоточной организации алгоритмов..... 252

Боран-Кешишьян А.Л., Загорёнов М.В., Флоря П.Н., Ярошенко А.А. Кондратьев С.И. Функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики..... 258

Тананыхин Д.С., Селимов А.Д., Сайченко Л.А. Обоснование применения маломинерализованного заводнения на поздней стадии разработки морских нефтяных месторождений (на английском языке)..... 265

CONTENTS	page
To memory of Yuriy Nechayev.....	12
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Tatiana P. Knysh, Mikhail V. Sukhoterin, Sergey O. Baryshnikov Bending of a ship's skin panel loaded along the axis of symmetry.....	14
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Aleksey L. Starichenkov, Nikolai V. Nikitin Simulation model for assessing the safety of water transport.....	20
Konstantin V. Gribov, Gennady A. Fedoreev, Alexey Y. Zhurenko Model studies of a prototype of a small multifunctional ekranoplan.....	28
Alexey E. Korepanov The influence of the layout features of the trimaran hull on its hydrodynamic resistance.....	37
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Yuriy P. Kuznetsov, Vladimir L. Khimich, Sergey N. Khrunkov, Aleksandr B. Chuvakov, Roman A. Pogodin Trends and development prospects of manual pneumatic grinding machines.....	42
Irina N. Ruban, Vladimir P. Bulgakov, Olesya V. Fyodorova Analysis of the reasons for the formation of under-collar cracks in the bushing of medium-speed combustion engines.....	48
Sergey I. Koryagin, Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov Assessment of the technical condition of ship hulls using mobile magnetic devices.....	54
Oleg V. Bashkov, Anna A. Afanaseva Study of the structure and frictional properties of a new composite friction material.....	59
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Valeriy T. Matviienko, Andrey V. Dologlonyan, Vladimir A. Ocheretianyi Control of characteristics of closed gas turbine plants of submarines propulsion complexes.....	66
Aleksandr B. Karakaev, Aleksandr V. Kostenko Checking the adequacy of polynomial dependencies of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems.....	71
Aleksandr B. Karakaev, Aleksandr V. Kostenko Development of a methodology for calculating and designing a single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems using a mathematical model obtained using experimental planning methods.....	79
Sergei V. Chekhranov, Rafail R. Simashov Influence of a rotating nozzle diaphragm on the characteristics of axial low-consumption turbines.....	86
Rafail R. Simashov, Sergei V. Chekhranov Selection of the optimal flow path and control program for the turbo drive of remotely operated underwater vehicle.....	90
Natalia V. Kutsenko Matvei V. Gribinichenko Andrey V. Nitiagovskii Alexei V. Kurenskiy, Olesya S. Portnova Numerical analysis of a radial hybrid lobe bearing with gas lubrication.....	98
Viktor V. Gerasidi, Alexey V. Lisahenko, Nikolay I. Nikolaev, Andrey E. Slitsan Assessment of thermal dispersion of elements of ship technical means of sea vessels.....	105
Valery V. Stenin, Irina V. Ershova, Vladimir A. Zhukov Simulation of thermal processes in the lining of the ship's boiler.....	112
Vladimir S. Egorkin, Igor E. Vyalyi, Nikolai V. Izotov, Alexander N. Minaev, Sergey L. Sinebryukhov, Sergey V. Gnedenkov Corrosion properties of AMg3 aluminum alloy treated by short-pulse plasma electrolytic oxidation in marine conditions.....	117
Yuriy V. Solomakhin, Lyudmila P. Tsigankova, Viktor N. Korshunov Distribution of kinetic energy losses between nozzles and turbine impeller on partial gas supply modes.....	122
INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS	
Dmitry N. Kobzarenko Analysis of time series – wind speeds and wind directions using neural network models and classification task.....	127
Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova, Nadezhda Y. Pyshkina, Yuri I. Vasilev Efficiency of spatially recursive algorithms for transmitting images of marine vessels.....	134

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Angelina M. Reztsova, Petr N. Zvyagin Noise analysis in a model experiment for measuring ice loads using ice free water run.....	142
Oleg M. Mikhov, Natalia V. Shatalova, Olga V. Borodina, Yuri I. Vasilev Application of machine learning technologies for Drone Network in logistics and port activities of Russia.....	149
Alexei S. Korenev, Sergei P. Khabarov, Andrei G. Shpectorov A route calculation for unmanned vessel.....	158
Svyatoslav A. Seliverstov, Yaroslav A. Seliverstov, Aleksey G. Kotenko, Ol'ga Yu. Lukomskaya, Natalya V. Shatalova, Olga V. Borodina Development of a structural diagram of a cognitive transport system.....	166

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Evgeny M. Burda, Sergey V. Perevezentsev, Valery I. Plyushchaev Integrated automation of wheeled ships technological processes.....	175
Alexander P. Shramko Optimization of transport - technological processes by dynamic programming.....	184
Sergey P. Cherniy, Anton K. Timofeev, Alina V. Buzikaeva Development of an intelligent electric drive control system anchor winch.....	195
Sergey A. Gordin, Ilya V. Zaichenko, Ksenya D. Khryapenko, Viktoria V. Bazheryanu Adaptive control systems for marine thermal installations.....	201

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Marina V. Botnaryuk, Natalya N. Ksenzova Econometric model for evaluating correlation of performance indicators of a stevedoring company.....	206
Timur G. Aygumov, Vladimir B. Melekhin Optimal management of efficiency gains manufacturing enterprises.....	214

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Ivan U. Lipko Rare roll event modeling of unmanned catamaran.....	219
Svetlana V. Lisenko, Nina S. Ivanko Formation and optimization of costs of production fishing activity of vessels.....	227
Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev Criteria for multiphysical similarity of the trawl complex.....	232
Roman V. Krasilnikov, Svetlana S. Zharova Mathematical modeling in the process of designing launch systems for marine robotic systems.....	238
Igor M. Dantsevich Adaptive multilayer management remotely operated underwater vehicle.....	245
Pavel V. Zhilyakov, Sergey I. Fateev Acceleration of the underwater system of technical stereo vision with the help of multithreaded organization of algorithms.....	252
Anastas L. Boran-Keshishyan, Mikhail V. Zamoryonov, Pavel N. Florya, Alexander A. Yaroshenko, Sergey I. Kondratyev Functioning of a technical system with an instantly replenished time reserve, taking into account preventive maintenance.....	258
Dmitry S. Tananykhin, Alik D. Selimov, Liliya A. Saychenko A justification of the application of low-mineralized flooding at the later stage of offshore oil field development (in English).....	265



Редакционная коллегия и редакционный совет научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» с глубоким прискорбием извещает о смерти **НЕЧАЕВА Юрия Ивановича**, члена редакционной коллегии нашего журнала, профессора кафедры Вычислительной техники и информационных технологий, доктора технических наук, учёного с мировым именем, наступившей 03 октября 2021 г. и выражает соболезнование его родным и близким.

Ю.И.Нечаев родился 25 января 1933 г. в г. Верея, Московская область. Выпускник 1958 г. Московского технического института рыбной промышленности по специальности "Судостроение и судоремонт", после перебазирования института в Калининград - аспирант, старший преподаватель, доцент (кандидат технических наук). Затем (1971-85 г.г.) - Севастопольский приборостроительный институт: доцент, профессор (доктор технических наук), заведующий кафедрой теории корабля и гидромеханики, проректор по научной работе. На этом этапе научные интересы Юрия Ивановича относились к разнообразным задачам динамики корабля и корабельных движителей; разработанные им методы использовались на практике не только в нашей стране, но и в США, Японии, в ряде стран Европы и Азии.

Став в 1995 г. профессором СПбГМТУ и возглавив кафедру Теоретической механики, Ю.И. Нечаев продолжал работать над проблемой создания корабельных интеллектуальных систем реального времени, руководил созданием систем обеспечения безопасности мореплавания судов и плавучих технических средств освоения Океана. Научные интересы в области интеллектуальных технологий (методы нечёткой логики, нейросетевые модели, генетические алгоритмы и т.п.) закономерно привели Ю.И.Нечаева в 2000 г. к переходу на кафедру Вычислительной техники и информационных технологий, профессором которой он работал до последних дней своей жизни.

Ю.И.Нечаев - автор более 650 научных работ, в том числе, 20 монографий, учебников, справочников, более 100 изобретений, подтверждённых патентами и

авторскими свидетельствами, руководитель секции "Искусственный интеллект в морских технологиях" НТО судостроителей, руководитель секции НТО Санкт-Петербургского отделения Российской Ассоциации "Нейроинформатика" член ряда специализированных советов по защитах диссертаций.

Ю.И. Нечаев был одним из основателей нашего научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» и с основания журнала в 2008г. входил в его редакционный совет. Он был регулярным автором нашего журнала начиная с первого номера.

Научные работы Ю.И. Нечаева отмечены высокими наградами и званиями:

Почетный академик Российской Академии Естественных Наук (2003)

Рыцарь науки и искусств (Россия, Япония, 2004)

Выдающийся ученый XXI века (Кембридж, Великобритания, 2007)

Заслуженный деятель науки РФ (2007)

Золотая модель за победу в рейтинге на должность Международного эксперта по высокопроизводительным вычислениям и интеллектуальным системам (Вашингтон, США, 2009)

Золотая медаль за доклад "Современная теория катастроф: концепция и приложения" (Кембридж, Великобритания, 2010)

Золотая медаль за доклад "Физико-философские аспекты интеллектуальных технологий XXI века"

Медаль имени Альберта Эйнштейна (США, 2011)

Почетный доктор Калининградского государственного технического университета (2012)

Медаль имени Исаака Ньютона (Великобритания, 2013)

Создав свою научную школу, Ю.И.Нечаев подготовил 17 докторов технических и физико-математических наук, 36 кандидатов наук, многих студентов – лауреатов конкурсов лучших студенческих научных работ. Своими энциклопедическими знаниями на передовых рубежах современной науки и огромным опытом творческой работы Ю.И.Нечаев щедро делился со студентами, аспирантами и коллегами по работе в СПбГМТУ, читал лекции по приглашениям ведущих российских и зарубежных вузов, таких как Национальный исследовательский университет ИТМО, Калининградский государственный технический университет, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Кэмбриджский, Бременский, Амстердамский университеты.

Юрий Иванович обладал высокими человеческими качествами, такими как честность, порядочность, доброжелательность, и многими замечательными способностями, которые делали общение с ним не только полезным, но и приятным занятием.

Юрии Иванович навсегда останется в памяти и в сердцах знавших его людей, его близких и друзей.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5:69. 04

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.102>

Изгиб панели обшивки корабля, нагруженной вдоль оси симметрии

Т.П. Кныш¹, e-mail: knyshtp@gumrf.ru, М.В. Сухотерин¹, e-mail: sukhoterinmv@gumrf.ru,
С.О. Барышников¹, e-mail: rector@gumrf.ru¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Задача изгиба прямоугольной панели обшивки от действия распределенной по оси симметрии поперечной нагрузки не имеет точного решения в конечном виде в виду сложности краевых условий и вида нагрузки. Использование другими авторами различных приближенных методов оставляет открытым вопрос о точности полученных результатов. Целью исследования является получение точного решения с помощью гипербола-тригонометрических рядов по двум координатам. Для этого используется метод бесконечной суперпозиции указанных рядов, которые в отдельности удовлетворяют лишь части граничных условий. Порождаемые ими невязки взаимно компенсируются в ходе итерационного процесса и стремятся к нулю. Частное решение представлено двойным рядом Фурье. Точное решение достигается увеличением количества членов в рядах и числа итераций. При достижении заданной точности процесс прекращается. Получены численные результаты для прогибов и изгибающих моментов для квадратной пластины при различной длине нагруженной части оси пластины. Представлены 3D-формы изогнутой поверхности пластины и эпюры изгибающих моментов.

Ключевые слова: заземленная прямоугольная пластина, нагрузка по оси симметрии, ряды Фурье, итерационный процесс

Bending of a ship's skin panel loaded along the axis of symmetry

Tatiana P. Knysh¹, e-mail: knyshtp@gumrf.ru, Mikhail V. Sukhoterin¹, e-mail: sukhoterinmv@gumrf.ru,
Sergey O. Baryshnikov¹, e-mail: rector@gumrf.ru¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Annotation. The problem of bending a rectangular skin panel from the action of a transverse load distributed along the axis of symmetry does not have an exact solution in the final form due to the complexity of the boundary conditions and the type of load. The use of various approximate methods by other authors leaves open the question of the accuracy of the results obtained. The aim of the study is to obtain an exact solution using hyperbolic-trigonometric series in two coordinates. To do this, we use the method of infinite superposition of these series, which individually satisfy only part of the boundary conditions. The residuals generated by them are mutually compensated during the iterative process and tend to zero. The quotient of the solution is represented by a double Fourier series. The exact solution is achieved by increasing the number of terms in the series and the number of iterations. When the specified accuracy is reached, the process stops. Numerical results are obtained for deflections and bending moments for a square plate with different lengths of the loaded part of the plate axis. 3D shapes of the curved surface of the plate and diagrams of bending moments are presented.

Keywords: clamped rectangular plate, load along the axis of symmetry, Fourier series, iterative process

Введение

Проблема исследования изгиба прямоугольной панели, заземленной по всем сторонам, под действием поперечной нагрузки, распределенной по части ее поверхности, является весьма актуальной при расчетах на прочность элементов обшивки кораблей, летательных аппаратов, затворов гидротехнических сооружений и т.п. Нагрузка, распределенная по линии, может передаваться на прямоугольную панель обшивки судна от воздействия какого-либо агрегата (грузового контейнера и т.п.) через его клиновидный элемент. Наиболее опасный случай, когда эта линия совпадает с осью симметрии панели (пластины).

Из фундаментальных работ, посвященных изгибу прямоугольных пластин от действия поперечной нагрузки, распределенной по прямой линии, отметим работы [1-4].

В книге С.Г. Лехницкого [1] приводится решение М. Huber [2] задачи изгиба длинной полосы с опертыми сторонами под действием нагрузки, распределенной по прямой линии, перпендикулярной опертым сторонам. Нагрузка считается разложимой в ординарный ряд Фурье по

этой линии. В книге С.П. Тимошенко и С. Войновского-Кригера [3] рассматривалась подобная задача изгиба длинной полосы, свободно опертой по двум параллельным длинным граням и заземленной по перпендикулярной грани. Задача решалась с использованием гипербола-тригонометрических рядов и свелась к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов этих рядов. В работе [4] приведены результаты расчета свободно опертой пластины конечных размеров от распределенной вдоль оси симметрии нагрузки, полученные методом конечных разностей (МКР).

Сложнее обстоит дело с заземленной по всем граням пластинке, на которых должны быть равны нулю прогибы и углы поворота.

В работах [3, 5] получено решение задачи о воздействии сосредоточенной силы, приложенной в центре заземленной по всему контуру пластины. В обеих работах использовались гипербола-тригонометрические ряды, но в [3] проблема свелась к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, а в [5] задача решалась итерационным методом суперпозиции исправляющих функций.

При исследовании изгиба пластин, защемленных по контуру используются различные приближенные методы: Ритца, Бубнова-Галеркина, Канторовича, другие модификации вариационного принципа, а также метод конечных элементов (МКЭ), который считают наиболее точным с учетом больших возможностей сгущения сетки [6-8]. Несмотря на высокие достоинства МКЭ имеет и существенные недостатки: сложность проверки выполнения граничных условий, «запирание» вычислительного процесса при значительном сгущении сетки конечных элементов и др. Поэтому этот метод часто сам нуждается в проверке на эталонных задачах, имеющих точное аналитическое (или численно-аналитическое) решение.

1. Постановка задачи

Рассмотрим защемленную по всему контуру прямоугольную пластину с размерами $a \times b \times h$, нагруженную некоторой поперечной нагрузкой $q(x, y)$. Начало прямоугольной системы координат $OXYZ$ поместим в центр пластины, оси OX и OY направим параллельно ее сторонам.

Прогиб срединной поверхности пластины, защемленной по контуру, определяется [3] из решения краевой задачи:

$$D \nabla^4 W(X, Y) = -q(X, Y), \tag{1}$$

$$W = 0, \frac{\partial W}{\partial X} = 0 \text{ при } X = \pm \frac{a}{2}, \tag{2}$$

$$W = 0, \frac{\partial W}{\partial Y} = 0 \text{ при } Y = \pm \frac{b}{2}. \tag{3}$$

где $D = Eh^3/(12(1-\nu^2))$ – цилиндрическая жесткость пластины, ∇^4 – бигармонический оператор, $W(x, y)$ – прогиб срединной поверхности пластины, E – модуль Юнга, h – толщина пластины, ν – коэффициент Пуассона.

Граничные условия (2, 3) выражают условия отсутствия прогибов и углов поворота заделанных сечений.

Поперечную нагрузку будем считать разложимой в двойной ряд Фурье

$$q(X, Y) = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,5,\dots}^{\infty} q_{ks} \cos \frac{\pi s X}{a} \cos \frac{\pi k Y}{b}, \tag{4}$$

где коэффициенты разложения находятся по формулам

$$q_{ks} = \frac{4}{ab} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} q(X, Y) \cos \frac{\pi s X}{a} \cos \frac{\pi k Y}{b} dX dY \tag{5}$$

Сначала рассмотрим случай, когда равномерная поперечная нагрузка действует на прямоугольном участке $U \times V$, центр которого совпадает с центром пластины, а стороны параллельны ее сторонам. Интенсивность нагрузки $q = P/(UV) = \text{const}$. Здесь P – заданная сила. Тогда из формулы (5) получим [3, 5]

$$q_{ks} = \frac{4P}{abUV} \int_{-\frac{U}{2}}^{\frac{U}{2}} \int_{-\frac{V}{2}}^{\frac{V}{2}} \cos \frac{\pi s X}{a} dX \cos \frac{\pi k Y}{b} dY =$$

$$= \frac{4P}{ab} \frac{\sin \frac{\pi s U}{2a}}{\frac{\pi s U}{2a}} \frac{\sin \frac{\pi k V}{2b}}{\frac{\pi k V}{2b}} \tag{6}$$

Будем теперь считать, что сила P приложена по оси OX в виде равномерно распределенной погонной нагрузки $q_0 = P/U$ на симметричном интервале длиной U (рис. 1).

Переходя к пределу в (6) при $V \rightarrow 0$, получим

$$q_s = \frac{4P}{ab} \frac{\sin \frac{\pi s U}{2a}}{\frac{\pi s U}{2a}} \tag{7}$$

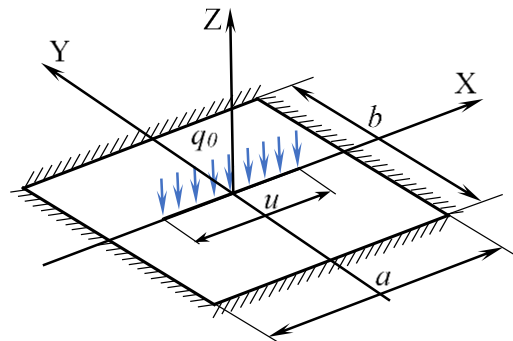


Рис. 1. Схема нагружения пластины

2. Методы и материалы

Перейдем к безразмерным величинам

$$x = \frac{X}{b}, y = \frac{Y}{b}, u = \frac{U}{b}, w = \frac{W}{q_0 b^4 / D},$$

$$q_0 = \frac{P}{V}, \gamma = \frac{a}{b}, \tag{8}$$

Тогда относительные размеры пластины в плане будут $\gamma \times 1$. Поперечная нагрузка с учетом (7) запишется формулой:

$$q(x, y) = \frac{4P}{V} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \tilde{\mu}_s}{\tilde{\mu}_s} \cos \mu_s x \cos \lambda_k y, \tag{9}$$

где $\tilde{\mu}_s = \mu_s u / 2$, $\mu_s = \pi s / \gamma$, $\lambda_k = k\pi$. Заметим, что внешний ряд является расходящимся, имитируя нагрузку, распределенную по прямой линии.

Уравнения задачи (1–3) преобразуются к виду

$$\nabla^4 w(x, y) = -4 \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \tilde{\mu}_s}{\tilde{\mu}_s} \cos \mu_s x \cos \lambda_k y, \tag{10}$$

$$w = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \text{ при } x = \pm \frac{\gamma}{2}, \tag{11}$$

$$w = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \text{ при } y = \pm \frac{1}{2}. \tag{12}$$

Частное решение уравнения (10) будет таким:

$$w_0(x, y) = -4 \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \tilde{\mu}_s \cos \mu_s x \cos \lambda_k y}{\tilde{\mu}_s (\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2} \tag{13}$$

Оно «автоматически» обеспечивает нулевые прогибы контура пластины, но порождает невязки во вторых граничных условиях (11), (12) по углам поворота:

$$\theta_{x0}\left(\frac{y}{2}, y\right) = \frac{\partial w_0}{\partial x} \Big|_{x=\frac{y}{2}} = - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} a_{k0} \cos \lambda_k y, \quad (14)$$

$$\theta_{y0}\left(x, \frac{1}{2}\right) = \frac{\partial w_0}{\partial y} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = - \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} b_{s0} \cos \mu_s x, \quad (15)$$

где

$$a_{k0} = 4 \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin \tilde{\mu}_s}{\tilde{\mu}_s} \frac{(-1)^{\tilde{s}} \mu_s}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2},$$

$$b_{s0} = 4 \frac{\sin \tilde{\mu}_s}{\tilde{\mu}_s} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\tilde{k}} \lambda_k}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2}, \quad (16)$$

Заметим, что при $x = -y/2$ и $y = -1/2$ эти выражения отличаются знаками. Здесь

$$\tilde{s} = (s+1)/2, \quad \tilde{k} = (k+1)/2$$

Для устранения невязки (14) привлечем исправляющую функцию 1-го вида:

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (A_k \operatorname{ch} \lambda_k x + B_k x \operatorname{sh} \lambda_k x) \cos \lambda_k y. \quad (17)$$

Неопределенные коэффициенты A_k, B_k определяются при удовлетворении условиям (11) из системы двух уравнений

$$\begin{cases} A_k \operatorname{ch} \frac{\lambda_k \gamma}{2} + B_k \frac{\gamma}{2} \operatorname{sh} \frac{\lambda_k \gamma}{2} = 0 \\ A_k \lambda_k \operatorname{sh} \frac{\lambda_k \gamma}{2} + B_k \left(\operatorname{sh} \frac{\lambda_k \gamma}{2} + \frac{\lambda_k \gamma}{2} \operatorname{ch} \frac{\lambda_k \gamma}{2} \right) = a_{k0} \end{cases} \quad (18)$$

Получим

$$A_k = -\frac{\gamma}{2} \operatorname{th} \bar{\lambda}_k \cdot B_k, \quad B_k = \frac{a_{k0}}{\eta_k \operatorname{ch} \bar{\lambda}_k}, \quad (19)$$

где

$$\bar{\lambda}_k = \lambda_k \gamma / 2, \quad \eta_k = \operatorname{th} \bar{\lambda}_k + \frac{\bar{\lambda}_k}{\operatorname{ch}^2 \bar{\lambda}_k}. \quad (20)$$

На гранях $y = \pm 1/2$ функция (17) нарушает второе условие (12), т.е. дает невязку, которую мы разложим в ряд Фурье:

$$\theta_{y1}\left(x, \frac{1}{2}\right) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} \lambda_k (A_k \operatorname{ch} \lambda_k x + B_{k1} x \operatorname{sh} \lambda_k x) - \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}} b_{s1} \cos \mu_s x,$$

$$b_{s1} = -\frac{8}{\gamma} \mu_s \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\tilde{k}} \lambda_k^2 B_{k1}}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2} \operatorname{ch} \bar{\lambda}_k. \quad (21)$$

Здесь использовались известные формулы разложения гиперболических функций в ряды Фурье по косинусам:

$$\operatorname{ch} \lambda_k x = -\frac{4}{\gamma} \operatorname{ch} \bar{\lambda}_k \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}} \frac{\mu_s \cos \mu_s x}{\lambda_k^2 + \mu_s^2},$$

$$x \operatorname{sh} \lambda_k x = \frac{2}{\gamma} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}} \left(\frac{-\gamma \operatorname{sh} \bar{\lambda}_k +}{4 \frac{\lambda_k \operatorname{ch} \bar{\lambda}_k}{\lambda_k^2 + \mu_s^2}} \right) \frac{\mu_s \cos \mu_s x}{\lambda_k^2 + \mu_s^2}. \quad (22)$$

Сложим невязки на гранях $y = \pm 1/2$ от функций w_0 и w_1 :

$$\begin{aligned} \theta_{y1}^* &= \theta_{y0} + \theta_{y1} = - \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} b_{s0} \cos \mu_s x - \\ &- \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}} b_{s1} \cos \mu_s x = - \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} b_{s1}^* \cos \mu_s x \end{aligned}, \quad (23)$$

где

$$b_{s1}^* = b_{s0} + (-1)^{\tilde{s}} b_{s1}$$

Будем компенсировать эти невязки исправляющей функцией 2-го вида:

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (C_s \operatorname{ch} \mu_s y + D_s y \operatorname{sh} \mu_s y) \cos \mu_s x \quad (24)$$

Коэффициенты ряда найдем при удовлетворении условиям (12), что дает

$$C_s = -\frac{1}{2} \operatorname{th} \bar{\mu}_s \cdot D_s, \quad D_s = \frac{b_{s1}^*}{\xi_s \operatorname{ch} \bar{\mu}_s}, \quad (25)$$

где

$$\bar{\mu}_s = \frac{\mu_s}{2}, \quad \xi_s = \operatorname{th} \bar{\mu}_s + \frac{\bar{\mu}_s}{\operatorname{ch}^2 \bar{\mu}_s} \quad (26)$$

Невязки от w_2 по углам поворота также разложим в ряд Фурье по косинусам:

$$\begin{aligned} \theta_{x1}\left(\frac{y}{2}, y\right) &= \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}} \mu_s (C_s \operatorname{ch} \mu_s y + D_s y \operatorname{sh} \mu_s y) = \\ &= - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}} a_{k1} \cos \lambda_k y, \end{aligned}$$

$$a_{k1} = -8 \lambda_k \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\tilde{s}} \mu_s^2 D_{s1}}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2} \operatorname{ch} \frac{\mu_s}{2}. \quad (27)$$

Эти невязки устраняются следующей исправляющей функцией w_{12} первого вида, но с другими коэффициентами. Далее вновь добавляется функция w_{22} и т.д. Заметим, что из-за наличия в невязках (21) и (27) знакопередающихся рядов, исправляющие функции в дальнейшем также будут представлены знакопередающимися рядами.

Искомую функцию прогибов можно записать в виде суммы функций

$$w(x, y) = w_0(x, y) + \sum_{n=1,2,\dots} w_{1n}(x, y) + w_{2n}(x, y), \quad (28)$$

где первое слагаемое есть частное решение, а под знаком суммы – исправляющие функции 1-го и 2-го вида:

$$w_{1n}(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} i \cdot (A_{kn} \operatorname{ch} \lambda_k x + B_{kn} x \operatorname{sh} \lambda_k x) \cos \lambda_k y. \quad (29)$$

$$w_{2n}(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} j \cdot (C_{sn} \operatorname{ch} \mu_s y + D_{sn} y \operatorname{sh} \mu_s y) \cos \mu_s x \quad (30)$$

где $l, j=1$ при $n=1$; $i = (-1)^{\tilde{k}}$, $j = (-1)^{\tilde{s}}$ при $n \geq 2$;

3. Результаты

В среде аналитических вычислений *Maple* была составлена программа для итерационного процесса определения функции прогибов и изгибающих моментов. Невязки выводились на печать на каждом шаге итерации, что позволяло контролировать процесс сходимости решения.

В качестве примеров рассматривалась квадратная пластина ($\nu = 1$), у которой длина дуги действия распределенной нагрузки по оси Ox принималась последовательно $u = \gamma, 0,5\gamma, 0$ (сосредоточенная сила в центре). Коэффициент Пуассона принят равным $\nu = 0,3$; число членов в рядах варьировалось до $n = 199$, число итераций – до $N = 20$.

Процесс оказался быстро сходящимся. Дальнейшее увеличение количества членов в рядах и числа итераций практически не влияло на точность вычислений.

На рис. 2-5 представлены прогибы и изгибающие моменты M_x, M_y квадратной пластины, когда нагрузка распределена по всей оси Ox . Сравнение видов изогнутой поверхности со стороны двух осей симметрии показывает, что поверхность более сжата в сечении $x = 0$ (поперек действия нагрузки), чем в сечении $y = 0$. На эпюрах изгибающих моментов (рис. 4, 5) наблюдается излом по линии действия нагрузки.

На рис. 6-8 изображены прогибы и изгибающие моменты при нагрузке, распределенной по половине оси Ox . Здесь наблюдается рост прогибов и изгибающих моментов.

На рис. 9, 10 представлены прогибы и изгибающие моменты при действии сосредоточенной силы в центре пластины. Прогиб в центре пластины достиг наибольшего значения 0.0056118 против 0.0042921 и 0.0026072 в предыдущих двух случаях. Изгибающие моменты в центре пластины бесконечны, так как представлены расходящимся числовым рядом, частичные суммы которого стремятся к бесконечности. Это подтверждает концентрацию напряжений в этой точке.

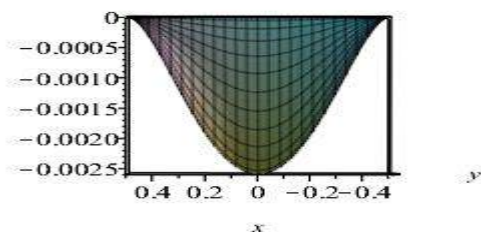


Рис. 2. Прогибы квадратной пластины (вид со стороны оси Oy). Нагрузка распределена по всей оси Ox пластины ($u=\gamma$). $w(0, 0) = -0.0026072$

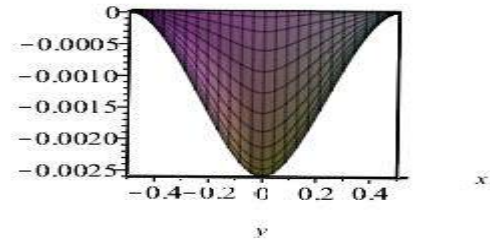


Рис. 3. Прогибы квадратной пластины (вид со стороны оси Ox). Нагрузка распределена по всей оси Ox пластины ($u=\gamma$).

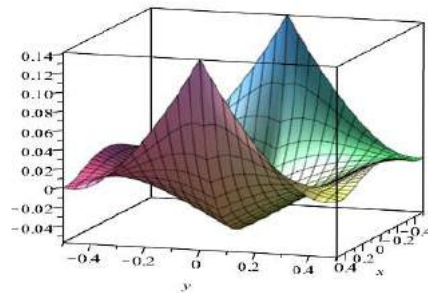


Рис. 4. Изгибающие моменты M_x квадратной пластины. Нагрузка распределена по всей оси Ox пластины ($u=\gamma$).

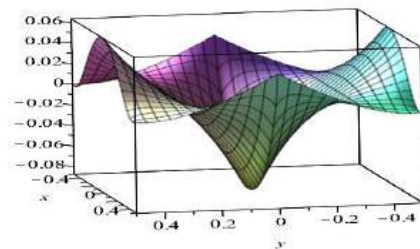


Рис. 5. Изгибающие моменты M_y квадратной пластины. Нагрузка распределена по всей оси Ox пластины ($u=\gamma$).

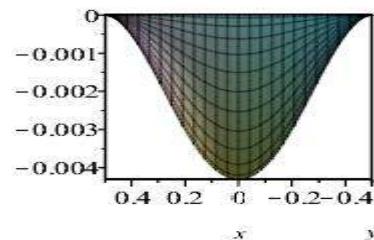


Рис. 6. Прогибы квадратной пластины (вид со стороны оси Oy). Нагрузка распределена по половине оси Ox пластины ($u=0,5\gamma$). $w(0, 0) = -0.0042921$

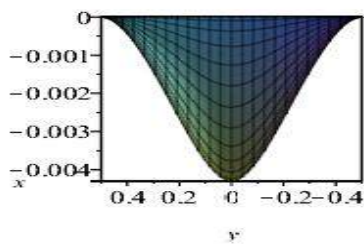


Рис. 7. Прогибы квадратной пластины (вид со стороны оси y). Нагрузка распределена по половине оси Ox пластины ($u=0.5y$).

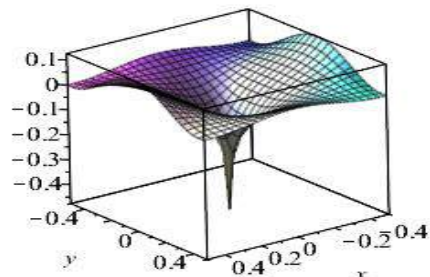


Рис. 10. Изгибающие моменты M_x квадратной пластины под действием сосредоточенной силы в центре

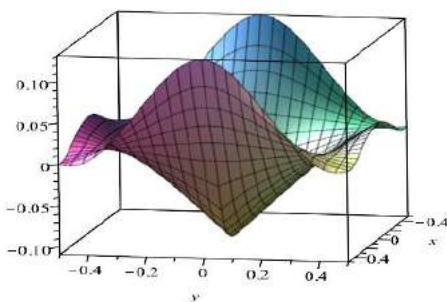


Рис. 8. Изгибающие моменты M_x квадратной пластины. Нагрузка распределена по половине оси Ox пластины ($u=0.5y$).

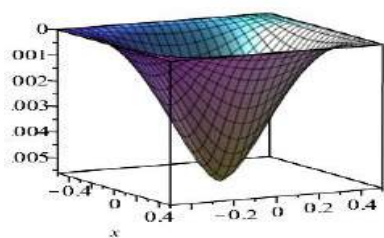


Рис. 9. Прогибы квадратной пластины под действием сосредоточенной силы в центре. $W(0, 0)=-0.0056118$

4. Обсуждение

Для сравнения приведем результаты, полученные в работе [3] при действии сосредоточенной силы в центре. Прогиб в центре пластины составил 0.0056 [3] против 0.0056118 в настоящей работе, изгибающий момент в середине защемленной стороны $M_x(0.5y, 0) = 0.1257$ [3] против 0.12551. Это говорит о достоверности результатов, полученных в настоящей работе. «Реакция» пластины на изменение длины нагруженной части оси Ox также соответствует реальному поведению данного элемента в условиях эксплуатации.

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы в проектно-конструкторских организациях при расчетах на прочность элементов обшивки судовых и гидротехнических конструкций. Вычислительный алгоритм позволяет быстро и с высокой точностью определить напряженно-деформированное состояние защемленных прямоугольных плоских элементов, нагруженных по осям симметрии и на малом центральном участке пластины.

Литература

1. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. М.–Л. ОГИЗ. Гос. изд-во технико-теоретич. литературы. 1947. 355 с.
2. Huber M.N. Probleme der Statik technisch wichtiger ortotroper Platten. Akademia Nauk Thechnicznich. Warszawa. 1929.
3. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М., Физматгиз, 1963. 635 с.
4. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Изд-во «Будівельник». Киев. 1970. 435 с.
5. Сухотерин М.В., Ломтева К.О. Оценка действия сосредоточенной силы на обшивку судна //Журнал университета водных коммуникаций. 2011. № 1(9). С. 43-47.
6. Tyukalov, Yu.Ya. Finite element models in stresses for bending plates. Magazine of Civil Engineering. 2018 82(6). Pp. 170–190.
7. Рыбаков В.А., Лалин В.В., Иванов С.С. Смешанный МКЭ в статике и динамике тонкостенных стержней. В сборнике: Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2019 (МНТК «ИМТОМ - 2019»). Материалы X Международной научно-технической конференции. Казань, 2019. С. 122-126.
8. Hassan K., Guirguis S., El-Hamouly H. Bending of an elastic rectangular clamped plate using Bergan-Wang approach. African Journal of Engineering Research. Vol. 5(1), pp. 7-17, February 2017

Reference

1. Lexniczkiy S.G. Anizotropny`e plastinki [Anisotropic plates]. М.–Л. ОГИЗ. Gos. izd-vo texniko-teoretich. literatury`. 1947. 355 s.

- Huber M.N. Probleme der Statik technisch wichtiger ortotroper Platten. Akademia Nauk Technicznych. Warszawa. 1929.
- Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger. Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill Book Company. New York, Toronto, London, 1959. 580 p.
- Vajnberg D.V., Vajnberg E.D. Raschet plastin [Calculation of plates]. Izd-vo «Budivel'nik». Kiev. 1970. 435 s.
- Sukhoterin M.V., Lomteva K.O. Ocenka dejstviya sosredotochennoj sily` na obshivku sudna [Estimate of the effect of concentrated force on the hull of the vessel]. Zhurnal universiteta vodny`x kommunikacij. 2011. 1(9). S. 43-47.
- Тюкалов, Ю.Я. Finite element models in stresses for bending plates. Magazine of Civil Engineering. 2018 82(6). Pp. 170–190.
- Ry`bakov V.A., Lalin V.V., Ivanov S.S. Smeshanny`j MKE` v statike i dinamike tonkostenny`x sterzhnej [Mixed FEM in the statics and dynamics of thin-walled rods]. V sbornike: Innovacionny`e mashinostroitel`ny`e tehnologii, oborudovanie i materialy` - 2019 (MNTK «ИМТОМ – 2019»). Materialy` X Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii. Kazan`, 2019. S. 122-126.
- Hassan K., Guirguis S., El-Hamouly H. Bending of an elastic rectangular clamped plate using Bergan-Wang approach. African Journal of Engineering Research. 2017. Vol. 5(1), pp. 7-17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Татьяна Петровна Кныш, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника управления информатизации, доцент кафедры прикладной математики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: knyshtp@gumrf.ru

Михаил Васильевич Сухотерин, доктор технических наук, заведующий кафедрой высшей математики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf_math@gumrf.ru

Сергей Олегович Барышников, доктор технических наук, ректор, заведующий кафедрой основ инженерного проектирования Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: rector@gumrf.ru

Tatiana P. Knysh, Ph.D. (Phys & Math), Associate professor, Head of Department of applied mathematics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: knyshtp@gumrf.ru

Mikhail V. Sukhoterin, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: kaf_math@gumrf.ru

Sergey O. Baryshnikov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Rector, Head of the Department of Engineering Design Fundamentals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: rector@gumrf.ru

Поступила в редакцию: 20.09.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 656.6.058

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.025>

Имитационная модель оценки безопасности водного транспорта

В.Ю. Каминский¹, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, Д.А. Скороходов¹, e-mail: skorohodda@mail.ru, А.Л. Стариченков², e-mail: allstar72@yandex.ru, Н.В. Никитин³, e-mail: morintex_spb@mail.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Показано, что выявление объективных причин аварий водного транспорта и последующее их устранение способствует радикальному повышению уровня безопасности. Сформирована причинно-следственная схема возникновения аварий водного транспорта в зависимости от главных, непосредственных, объективных и сопутствующих причин. Установлено, что при обосновании рациональных способов априорной количественной оценки степени опасности проектируемого оборудования необходимо исходить из неприемлемости проведения специальных натурных испытаний, инициирующих аварии. С этой целью рекомендуется имитационное моделирование. Предложена имитационная модель оценки вероятности возникновения аварий в процессе эксплуатации энергетической судовой установки. Функционирование имитационной модели основано на том, что возникновение происшествий является следствием развития причинно-следственной связи предпосылок, триггерами и составными частями которой являются ошибочные действия или бездействие членов команды судна, неполадки и отказы технологического оборудования, а также неучтенное воздействие внешних факторов. Систематизированы факторы, способствующие возникновению аварий и инцидентов, в составе которых: технические факторы; личностные и факторы воздействия внешней среды. В общем виде решение задачи обеспечения безопасности судна с использованием предложенной модели сводится к отысканию функциональной зависимости вероятности возникновения аварии и оценкой факторов опасности, которая уже на стадии проектирования судового оборудования позволяет количественно оценить вероятность возникновения аварий в процессе эксплуатации водного транспорта. Приведен пример количественной оценки вероятности возникновения аварии. Предложено в состав обязательных документов, обеспечивающих проектирование водных транспортных средств, включать «Программу обеспечения безопасности», которая должна определять перечень работ и мероприятий, проводимых на всех стадиях жизненного цикла судна.

Ключевые слова: моделирование, формализация, аварийный процесс, причины аварии, безопасность, риск, система, фактор опасности, функциональная зависимость, факторный эксперимент.

Simulation model for assessing the safety of water transport

Valery Yu. Kaminsky¹, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, Dmitriy A. Skorokhodov¹, e-mail: skorohodda@mail.ru, Aleksey L. Starichenkov², e-mail: allstar72@yandex.ru, Nikolai V. Nikitin³, e-mail: morintex_spb@mail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation, ²Saint-Petersburg Electrotechnical University LETI, ³St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation Saint-Petersbur, Russian Federation

Abstract. It is shown that the identification of objective causes of accidents of water transport and their subsequent elimination contributes to a radical increase in its safety level. A causal scheme of the occurrence of accidents of water transport has been formed, depending on the main, direct, objective and concomitant causes. It is established that when justifying rational methods of a priori quantitative assessment of the degree of danger of the designed equipment, it is necessary to proceed from the unacceptability of conducting special full-scale tests that initiate accidents. For this purpose, simulation modeling is recommended. A simulation model for estimating the probability of accidents during the operation of a ship's power plant is proposed. The functioning of the simulation model is based on the fact that the occurrence of accidents is a consequence of the development of a causal relationship of prerequisites, the triggers and components of which are erroneous actions or inaction of the ship's crew members, malfunctions and failures of technological equipment, as well as the unaccounted impact of external factors. The factors contributing to the occurrence of accidents and incidents are systematized, including: technical factors; personal and environmental factors. In general, the solution of the problem of ensuring the safety of a vessel using the proposed model is reduced to finding the functional dependence of the probability of an accident and assessing the hazard factors, which already at the design stage of ship equipment allows us to quantify the probability of accidents during the operation of water transport. An example of a quantitative assessment of the probability of an accident is given. It is proposed that the "Safety Program" should be included in the mandatory documents that ensure the design of water vehicles, which should determine the list of works and activities carried out at all stages of the vessel's life cycle.

Keywords: modeling, formalization, emergency process, accident causes, safety, risk, system, hazard factor, functional dependence, factor experiment.

Введение

Моделирование широко применяется как метод, позволяющий выявить закономерности или свойства исследуемых процессов и явлений, а также оценить их количественные показатели. Модель в той или

иной форме воспроизводит существенные свойства процесса-оригинала, являясь, в указанном смысле, его эквивалентом и позволяет в процессе исследований получить необходимую информацию.

Для формирования модели безопасности важнейшее значение имеет формализация процесса

трансформации функционирования системы из нормального в аварийное состояние, при котором возникает или реализуется реальная угроза гибели судна, жизни человека, потери груза, негативного воздействия на окружающую среду и т.д.

1. Схемы моделей безопасности

Развитие аварийного процесса на водном транспорте можно представить схемой, представленной на рис. 1.

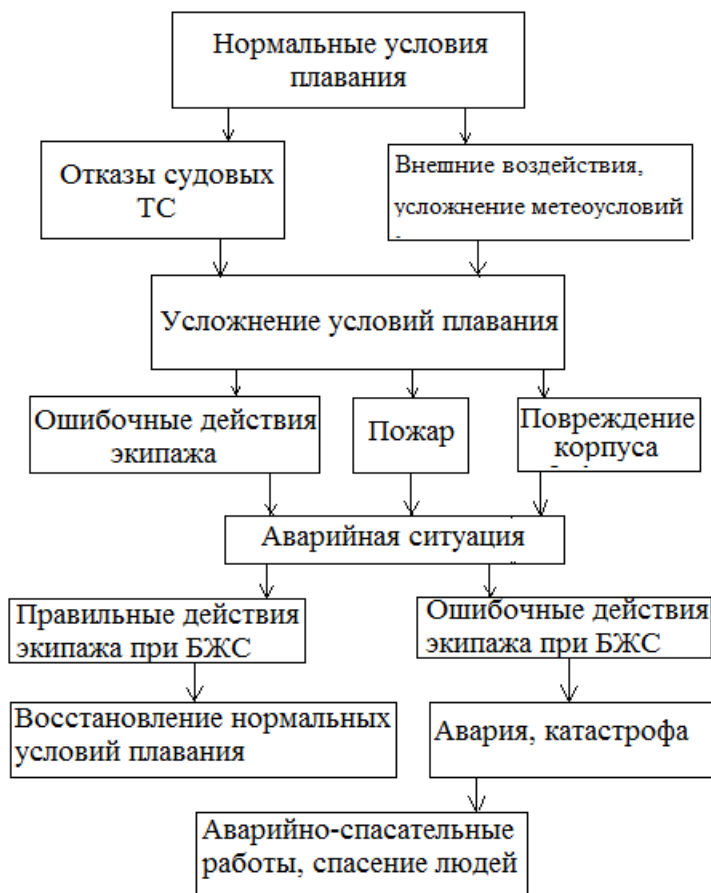


Рис.1 Схема модели возникновения аварий водного транспорта: ТС – технические средства, БЖС – борьба за живучесть судна

Несмотря на простоту и наглядность приведённой модели она не даёт представления о значении, «весе», отдельных факторов, влияющих на безопасность. Для принятия радикальных мер по снижению риска при мореплавании важно выяснить, в какой мере определённые факторы могут

привести к трагическим последствиям [1]. Поэтому более информативной является модель, схема которой приведена на рис.2, в которой учитываются различные категории причин аварии: объективные, главные, сопутствующие и непосредственные.

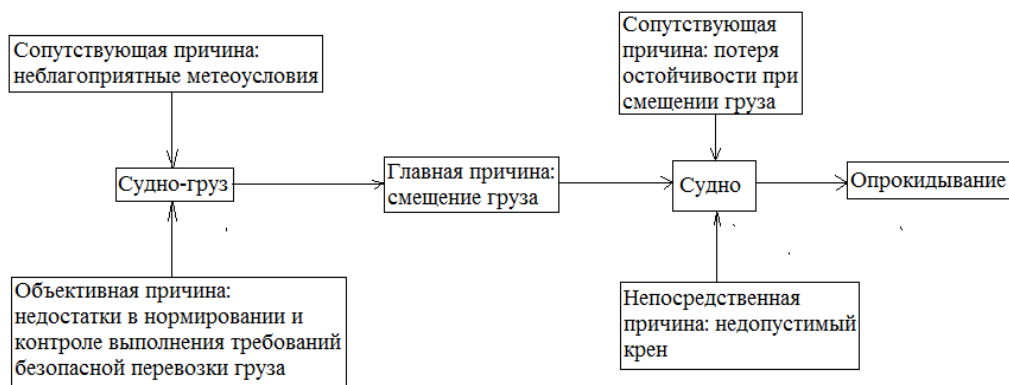


Рис. 2 Схема причинно-следственной модели возникновения аварий водного транспорта

Объективные причины аварий не связаны с конкретными условиями плавания судна. Они определяются сложившейся системой обеспечения безопасности на море. Выявление объективных причин аварий и инцидентов способствует радикальному снижению риска, хотя и требует принятия государственных мер.

Главная причина происшествия связана с конкретным судном, его составной частью, экипажем, свойствами перевозимого груза и конкретными условиями эксплуатации.

Непосредственные и сопутствующие причины создают условия для превращения потенциальной возможности возникновения аварии в реальность.

При расследовании аварийных случаев могут возникнуть различные точки зрения как в ходе определения причин аварии, так и по их классификации. В этом случае целесообразно применять метод экспертных оценок с привлечением независимых экспертов.

Авария возникает, как правило, в результате совместного действия нескольких неблагоприятных факторов, причем один и тот же фактор, в зависимости от обстоятельств, может быть следствием различных причин.

2. Вид и структура модели безопасности

Вид и структура разрабатываемой модели безопасности зависит от задач, стоящих перед исследователем. Разнообразные факторы опасности, присутствующие в модели, классифицируются следующим образом:

- технические факторы;
- личностные факторы;
- факторы воздействия внешней среды.

При анализе технических факторов помимо показателей надежности технических средств и оборудования необходимо учитывать также их состав, степень автоматизации, соответствие мировому уровню развития средств контроля, методов и средств борьбы за живучесть судна, спасательных средств. Это позволит обоснованно оценить вероятность возникновения аварийной ситуации от *i*-го фактора, вероятность ликвидации (локализации) аварийной ситуации или вероятность спасения экипажа, а также другие вероятностные характеристики [2-5].

Задачи по обеспечению безопасности зависят от этапа жизненного цикла судна. При создании и эксплуатации судна должны быть реализованы организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность и направленные на достижение, поддержание и контроль заданного уровня безопасности для всех элементов системы. С этой целью в составе обязательных документов при проектировании судна необходимо разработать «Программу обеспечения безопасности» (ПОБ), которая должна определять перечень работ и мероприятий, проводимых на всех стадиях жизненного цикла судна. При разработке ПОБ

целесообразно учитывать опыт проектирования и эксплуатации других видов транспортных средств.

Также, обеспечение безопасности потребует реализации следующих мероприятий:

- профессиональной подготовки, медицинского, правового и социального обеспечения экипажей судов;
- совершенствования береговых систем управления движением судов;
- создания единой государственной морской поисково-спасательной службы (ЕГМПСС) для оперативного осуществления аварийно-спасательных и поисковых работ.

Помимо вышеперечисленных мероприятий необходимо уделять особое внимание разработке и совершенствованию системы управления безопасностью судоходных компаний (СУБ СК) [6].

Один из принципиальных аспектов анализа безопасности - необходимость не только качественной, но и количественной оценки степени опасности эксплуатируемого оборудования. При обосновании рациональных способов априорной количественной оценки опасности проектируемого оборудования необходимо исходить из неприемлемости (по этическим и экономическим соображениям) проведения специальных натуральных испытаний, инициирующих аварии. Целесообразным способом исследования является имитационное моделирование на базе логико-лингвистической модели процесса возникновения происшествий [7]. Функционирование имитационной модели основано на том, что возникновение происшествий является следствием развития причинно - следственной связи предпосылок, триггерами и составными частями которой являются ошибочные действия или бездействие членов команды судна, неполадки и отказы технологического оборудования, а также неучтенное воздействие внешних факторов.

Анализ статистических данных позволил выявить основные причины аварий и инцидентов (ошибки персонала, отказы оборудования и нерасчетные воздействия внешней среды), которые при возникновении аварии обычно выстраиваются в цепь предпосылок. Несмотря на незначительные колебания вклада различных причин в общую картину аварийности, в целом, порядок этих величин при оценке безопасности транспортных средств различного вида сохраняется.

Согласно статистическим данным об общих причинах аварийности в рамках имитационного моделирования учтём лишь наиболее существенные аварийные факторы, среди которых выделим четыре группы: влияние рабочей среды, безопасность оборудования, уровень используемой технологии и характеристики человека-оператора (табл. 1). Каждый из представленных факторов включает ряд составляющих. Так, например, значение фактора «Качество мотивационной установки» включает ответственность оператора, его морально-волевые качества, влияние коллектива, боязнь потерять работу, размер заработной платы. Аналогично оцениваются и другие факторы [8].

Таблица 1

Состав и характеристики существенных факторов опасности

Группа	Код	Фактор опасности	Доля в общих причинах аварийности и травматизма	
Рабочая среда	C01	Комфортность рабочей среды по физико-химическим параметрам	0,028	
	C02	Качество информационной модели состояния среды	0,048	
	C03	Возможность внешних опасных воздействий	0,045	
	C04	Возможность внешних неблагоприятных воздействий	0,025	
Персонал	H01	Соответствие по физиологическим показателям	0,02	
	H02	Технологическая дисциплинированность	0,04	
	H03	Качество приема и декодирования информации	0,062	
	H04	Навыки выполнения работ	0,04	
	H05	Качество мотивационной установки	0,04	
	H06	Знание технологии работ	0,033	
	H07	Знание физической сущности процессов в системе	0,04	
	H08	Способность правильно оценивать информацию	0,043	
	H09	Качество принятия решения	0,06	
	H12	Самообладание в экстремальных ситуациях	0,056	
	H13	Выработка действий в нештатных ситуациях	0,047	
	H14	Точность корректирующих действий	0,06	
	Оборудование	M01	Конструкция рабочего места оператора	0,045
		M02	Степень учета особенностей работоспособности оператора	0,015
M03		Наличие источников опасных и вредных факторов	0,02	
M04		Надежность вспомогательных узлов и элементов	0,03	
M05		Безотказность основных узлов и элементов	0,055	
M06		Длительность действия опасных и вредных факторов	0,007	
M07		Уровень потенциала опасных и вредных факторов	0,007	
M08		Безотказность приборов и устройств безопасности	0,026	
Технология	T01	Удобство подготовки и выполнения работ	0,02	
	T02	Удобство технического обслуживания и ремонта	0,038	
	T03	Сложность алгоритмов оператора	0,012	
	T04	Возможность появления человека в опасной зоне	0,008	
	T05	Возможность появления других незащищенных элементов в опасной зоне	0,01	
	T06	Надежность технологических средств обеспечения безопасности	0,02	

3. Оценка вероятности возникновения аварий

С целью формализации исходных данных используется балльная система оценки фактора,

опирающаяся на универсальную лингвистическую шкалу, отображённую в числовом виде, что позволяет унифицировать качественные и количественные исходные данные, (табл. 2):

Таблица 2

Лингвистическая шкала оценок

Лингвистическая шкала оценок	Числовое значение
Низкое	-1,0
Ниже среднего	-0,667
Среднее	-0,333
Выше среднего	0
Хорошее	0,333
Очень хорошее	0,667
Высокое	1,0

В общем виде решение рассматриваемой задачи сводится к нахождению функциональной зависимости между величиной факторов опасности и вероятностью возникновения аварии в человеко-машинной системе, т.е.:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_{30}), \tag{1}$$

где x_1, x_2, \dots, x_{30} – формализованные значения факторов опасности.

В процессе моделирования варьировались значения восьми факторов (M01-M08), характеризующих степень безопасности используемого оборудования (табл.3). Явный вид зависимости (1) сформирован с применением методов планирования эксперимента [9]. Каждый из факторов оценивается на двух уровнях: «+1» -

высокое значение фактора; «-1» - низкое значение фактора. Поскольку учитывается восемь факторов безопасности, общее число испытаний в полном факторном эксперименте составляет $N=2^8=256$. Для сокращения количества испытаний проведём дробный факторный эксперимент, матрица планирования которого строится в рамках полного факторного эксперимента $N=2^5$, а реализация требует проведения 32 испытаний. В результате рассчитаны значения факторных коэффициентов в уравнении регрессии. После оценки значимости, по критерию Стьюдента, всех коэффициентов и исключения незначимых получим уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & 1,73 \cdot 10^{-4} - 4,37 \cdot 10^{-5} x_1 - 1,60 \cdot 10^{-5} x_2 - 6,95 \cdot 10^{-5} x_3 - \\ & - 4,26 \cdot 10^{-5} x_4 - 4,26 \cdot 10^{-5} x_5 - 1,59 \cdot 10^{-5} x_6 - 3,38 \cdot 10^{-5} x_7 - \\ & - 4,03 \cdot 10^{-5} x_8 + 6,2 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 + 1,63 \cdot 10^{-5} x_1 x_3 + 1,02 \cdot 10^{-5} x_1 x_4 + \\ & + 7,3 \cdot 10^{-6} x_1 x_5 + 4,8 \cdot 10^{-6} x_2 x_3 + 1,68 \cdot 10^{-5} x_3 x_4 + 1,65 \cdot 10^{-5} x_3 x_5 + \\ & + 7,9 \cdot 10^{-6} x_4 x_5 - 3,8 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 x_3 - 6,2 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 x_4 - 3,5 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 x_5 + \\ & + 3,6 \cdot 10^{-6} x_1 x_4 x_5 + 7,1 \cdot 10^{-6} x_2 x_3 x_4 + 7,8 \cdot 10^{-6} x_2 x_3 x_5 + \\ & + 1,32 \cdot 10^{-5} x_2 x_4 x_5 + 1,05 \cdot 10^{-5} x_1 x_2 x_3 x_4 + 8,6 \cdot 10^{-6} x_1 x_2 x_3 x_5 + \\ & + 1,58 \cdot 10^{-5} x_1 x_2 x_4 x_5, \end{aligned} \tag{2}$$

где x_1 - фактор M03 (см. табл.3); x_2 - фактор M06; x_3 - фактор M01; x_4 - фактор M02; x_5 - фактор M05; x_6 - фактор M07; x_7 - фактор M08; x_8 - фактор M04.

Таблица 3

Характеристика и значимость факторов безопасности оборудования

Фактор опасности (код)	Составляющие фактора	Значимость составляющих фактора
Качество конструкции рабочего места (M01)	Динамика физической нагрузки	0,15
	Масса вручную поднимаемого и перемещаемого груза	0,15
	Статическая нагрузка	0,15
	Рабочая поза	0,15
	Наклоны корпуса	0,15
	Перемещение в пространстве (технологические переходы)	0,15
	Стереотипные движения	0,1
Степень учета особенностей работоспособности оператора (M02)	Учет возможных психофизиологических состояний оператора	0,35
	Состояние оборудования	0,35
	Защита от возможных неадекватных действий оператора	0,3
Наличие источников опасных и вредных факторов (M03)	Общее количество источников опасности (электроэнергия, механическая энергия, сжатый воздух и др.)	0,4
	Летальность воздействия энергоисточников	0,3
	Разрушающий потенциал энергоисточников	0,3
Надежность вспомогательных узлов и элементов (M04)	Надежность вспомогательных неотчетливых элементов установки, отказ которых не может стать непосредственной причиной аварии	1,0
Безотказность основных узлов и элементов (M05)	Надежность основных элементов конструкции установки (КИП, средства сигнализации и защиты), отказ которых может, в определенных условиях, привести к аварии	1,0
Длительность действия опасных и вредных факторов (M06)	Скорость срабатывания средств противопожарной защиты	0,3
	Скорость и надежность локализации возгораний	0,4
	Надежность средств индивидуальной защиты	0,3
Потенциал опасных и вредных факторов (M07)	Объем запасов топлива	0,4
	Класс опасности горючих материалов	0,3
	Рабочее напряжение электроустановок	0,1
	Рабочее давление сжатых газов	0,1
	Механическая энергия установок	0,1
Безотказность приборов и устройств безопасности (M08)	Надежность приборов и устройств безопасности установки (предохранительные клапаны, автоматические выключатели и др.), отказ которых является непосредственной причиной возникновения аварии	1,0

Оценим вероятность аварии по выражению (2). Примем, что значения всех факторов опасности спроектированной установки получили оценку экспертов - «выше среднего», т.е. числовые значения всех факторов равны 0 (см. табл. 2). Тогда из выражения (2) получим, что вероятность аварии при работе судовой установки в пределах одной вахты (4 ч) будет равна $1,73 \cdot 10^{-4}$.

Допустим, что после доработки приборов и устройств безопасности значение фактора M08 (x_7) эксперты оценили, как «высокое», что соответствует величине фактора 1,0. После подстановки $x_7 = 1,0$ (значения остальных факторов остались равными 0) в уравнение (2) получим, снижение вероятности возникновения аварии - $1,33 \cdot 10^{-4}$.

Следовательно, применяя выражение (2) на стадии проектирования судового оборудования можно количественно оценить вероятность возникновения аварий в процессе эксплуатации водного транспортного средства.

Заключение

Выявление причин аварий и последующее их устранение способствует радикальному повышению уровня безопасности водного транспорта.

Сформирована причинно-следственная схема возникновения аварий водного транспорта в зависимости от главных, непосредственных, объективных и сопутствующих причин.

При обосновании рациональных способов априорной количественной оценки опасности проектируемого оборудования необходимо исходить из неприемлемости проведения специальных натурных испытаний, инициирующих аварии. Целесообразным способом исследования является имитационное моделирование на базе логико-лингвистической модели процесса возникновения аварий.

Предложена имитационная модель оценки вероятности возникновения аварий в процессе эксплуатации энергетической установки. Функционирование имитационной модели основано на том, что возникновение происшествий является следствием развития причинно-следственной связи предпосылок, триггерами и составными частями которой являются ошибочные действия или бездействие членов команды судна, неполадки и отказы технологического оборудования, а также неучтенное воздействие внешних факторов.

Систематизированы факторы, способствующие возникновению аварий и инцидентов, в составе которых: технические факторы; личностные и

факторы воздействия внешней среды. В общем виде решение задачи обеспечения безопасности судна с использованием предложенной модели сводится к отысканию функциональной зависимости вероятности возникновения аварии с последующей оценкой факторов опасности, которая уже на стадии проектирования судового оборудования позволяет количественно оценить вероятность возникновения аварий в процессе эксплуатации водного транспорта.

При создании и эксплуатации судна должны быть реализованы организационные и технические мероприятия, обеспечивающие его безопасность и направленные на достижение, поддержание и контроль заданного уровня безопасности для всех элементов системы. С этой целью в составе обязательных документов при проектировании предлагается разработать «Программу обеспечения безопасности» (ПОБ), которая должна определять перечень работ и мероприятий, проводимых на всех стадиях жизненного цикла судна. При разработке ПОБ целесообразно учитывать опыт проектирования и эксплуатации других видов транспортных средств.

Литература

1. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Конструктивная безопасность высокоскоростного водного транспорта / ред. Д. А. Скороходов. - Санкт-Петербург: ИПА ВУЗ, 2020. - 278 с.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Анализ и перспективы развития скоростных судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 10-20.
3. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 153-163.
4. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 185-194.
5. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 209-214.
6. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Стариченков А.Л. Принципы оценки эффективности системы управления безопасностью судоходной компании // Морской вестник. 2018. № 1 (65). С. 105-108.
7. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Поляков А.С. Методика оценки эффективности комплексной безопасности транспортной компании // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы. 2015. №2. С.24-29.
8. Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н., Каминский В.Ю. Моделирование действий специалистов водного транспорта методом профессионально-аксиологического анализа механизмов принятия решений // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 183-189.
9. Степанов И.В., Турусов С.Н., Скороходов Д.А. Системы управления готовностью технических средств морских подвижных объектов. - Санкт-Петербург: ИПА ВУЗ, 2019. - 290 с.

References

1. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.Yu. Konstruktivnaya bezopasnost' vysokoskorostnogo vodnogo transporta [Structural safety of high-speed water transport] / red. D. A. Skorohodov. Sankt-Peterburg. IPA VUZ, 2020. 278 pp.
2. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Analiz i perspektivy razvitiya skorostnyh sudov [Analysis and prospects for the development of high-speed vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 3-1 (41). pp. 10-20.
3. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie algoritmicheskoy struktury sistemy upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh krylyah [Investigation of the algorithmic structure of the hydrofoil motion control system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 153-163.
4. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravleniya dvizheniem [Reliability of motion control systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 185-194.
5. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A. Metodika uchyota professional'no-cennostnogo aspekta dejstvij sudovoditelya vo vremya trenazhyornoj podgotovki [The methodology of taking into account the professional and value aspect of the actions of the skipper during the simulator training] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 209-214.
6. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Starichenkov A.L. Principy ocenki effektivnosti sistemy upravleniya bezopasnost'yu sudohodnoj kompanii [Principles of evaluating the effectiveness of the safety management system of a shipping company] // Morskoj vestnik. 2018. № 1 (65). pp. 105-108.

7. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Polyakov A.S. Metodika ocenki effektivnosti kompleksnoj bezopasnosti transportnoj kompanii [Methodology for evaluating the effectiveness of integrated security of a transport company] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby. 2015. №2. pp. 24-29.
8. Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N., Kaminsky V.Yu. Modelirovanie dejstvij specialistov vodnogo transporta metodom professional'no-aksiologicheskogo analiza mekhanizmov prinyatiya reshenij [Modeling of actions of water transport specialists by the method of professional axiological analysis of decision-making mechanisms] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 3-1 (41). pp. 183-189.
9. Stepanov I.V., Turusov S.N., Skorohodov D.A. Sistemy upravleniya gotovnost'yu tekhnicheskikh sredstv morskikh podvizhnyh ob"ektov [Readiness management systems for technical means of marine mobile objects]. Sankt-Peterburg. IPA VUZ, 2019. 290 pp.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: skorohodda@mail.ru

Алексей Леонидович Стариченко, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5; e-mail: allstar72@yandex.ru

Николай Васильевич Никитин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: morintex_spb@mail.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, PhD (Eng.), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Alexey L. Starichenkov, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: allstar72@yandex.ru

Nikolai V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: morintex_spb@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 06.11.2021

Модельные исследования опытного образца малого многофункционального экраноплана

К.В. Грибов¹, e-mail: gribov.kvt@dvfu.ru, Г.А. Федореев², e-mail: stt@mail.primorye.ru,
А.Ю. Журенко², e-mail: stt@mail.primorye.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, ²Союзмортранс

Аннотация. Использование экранопланов в различных климатических условиях, как многофункционального транспортного средства, обладающего амфибийными свойствами, позволяет решить множество задач на водном пространстве. Для труднодоступных территорий России экранопланы могут обеспечить доступность прибрежных населенных пунктов, расширив использование водного транспорта в межсезонье и при организации транспортных линий в зимний период или в Арктике. В статье рассмотрены результаты исследований по созданию лёгкого 2х-местного амфибийного экраноплана-трансформера для круглогодичного индивидуального и служебного использования в отсутствие транспортной инфраструктуры. Разрабатываемое транспортное средство будет объединять несколько принципов движения, адаптированных к различным условиям эксплуатации: по льду, снегу, воде, над водой посредством его конструктивной трансформации в аэросани, аэроглиссер и экраноплан для обеспечения конкурентного преимущества на потребительском рынке индивидуального водного транспорта. Выполнены работы по оптимизации аэродинамических схем трансформера с использованием продувок экспериментальных аэротрубных моделей и математического 3D моделирования. Акцент сделан на решении вопроса достижения максимального аэрогидродинамического качества.

Ключевые слова: аэродинамическая схема, аэрогидродинамическое качество, аэросани, аэроглиссер, экраноплан, трансформер, аэротрубная модель, 3D моделирование.

Model studies of a prototype of a small multifunctional ekranoplan

Konstantin V. Gribov¹, e-mail: gribov.kvt@dvfu.ru, Gennady A. Fedoreev², e-mail: stt@mail.primorye.ru,
Alexey Y. Zhurenko², e-mail: stt@mail.primorye.ru

¹Far Eastern Federal University, ²Soyuzmortsans, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The use of ekranoplans in various climatic conditions as a multifunctional vehicle with amphibious properties makes it possible to solve key tasks on water areas. For remote territories of Russia, ekranoplans can maintain accessibility of coastal settlements, expanding the use of water transport in the off-season and when organizing transport lines in the winter and in the Arctic. The article discusses the results of research on the construction of a light 2-seater amphibious transformer ekranoplan for year-round personal and official use in the absence of transport infrastructure. The vehicle under development will combine several principles of movement adapted to various operating conditions: on ice, snow, water, over water - by means of its constructive transformation into an aerosled, an airboat and an ekranoplan to provide a competitive advantage in the consumer market for individual water transport. Work has been done to optimize aerodynamic schemes of the transformer using virtual blowdowns of experimental wind tunnel models based on mathematical 3D modeling. The emphasis is placed on solving the issue of achieving maximum aero- and hydrodynamic quality.

Key words: aerodynamic scheme, aero- and hydrodynamic quality, aerosled, airboat, ekranoplan, transformer, wind tunnel model, 3D modeling.

Введение

В настоящее время экранопланостроение получает широкое распространение в мире, а в России переживает второе рождение. 27 июня 2019 принята государственная концепция «Развития экранопланостроения в Российской Федерации» [1] (далее - Концепция) в соответствии с которой экранопланы обладают возможностью эффективного решения целого ряда специальных задач: поисково-спасательных, экологических, патрульных и др.

В России преимущества экранопланов могут быть реализованы в наибольшей степени при обеспечении Северного морского пути и на водных акваториях Сибири и Дальнего Востока [2] для решения социальной задачи транспортного сближения отдаленных районов страны и крупных промышленных центров. Как более далекая перспектива может рассматриваться применение тяжелых экранопланов и их разновидности транспортно-амфибийных платформ (ТАП) для

скоростной перевозки крупногабаритных тяжелых грузов.

Исследования, проектирование и строительство экранопланов ведут следующие зарубежные страны: Германия, Китай, Иран, Республика Корея, Австралия, США, Япония; ряд стран Юго-Восточной Азии. Имеются сведения о проведении разработок экранопланов во Франции, Украине, Великобритании, Канаде, Индии, Израиле, Турции.

Каждая страна развивает экранопланы применительно к собственным экономическим или военным задачам. Известно создание нескольких вариантов беспилотных аппаратов, использующих экранный эффект.

Под руководством Российского Морского Регистра Судоходства в Международной морской организации были разработаны требования безопасности экранопланов [5].

Принятая Концепция направлена на преодоление следующих основных организационных проблем современного экранопланостроения в России:

- незавершенность формирования необходимой нормативно-правовой базы, включая Правила классификации и постройки Регистра морского судоходства для малых экранопланов типа «А» [4], разработанные в 1998 году, которые устарели и требуют переработки;

- тридцатилетний перерыв в научных исследованиях, моральное старение прежних научно-технических достижений, старение и утрата квалифицированных кадров, недостаточный приток молодых кадров, отсутствие у них стимулов в освоении и развитии экраноплановых технологий;

- отсутствие в промышленном комплексе собственных финансовых ресурсов для развития экранопланостроения, тяжелые условия долгосрочного кредитования;

- отсутствие стимулов для отечественных и иностранных компаний к вложению инвестиций в российское экранопланостроение.

Реализация Концепции предполагает два этапа: 1 этап - 2019-2024 годы; 2 этап - 2024-2030 годы; 3 этап – после 2030 года.

На первом этапе, характеризующемся разработкой опытных образцов экранопланов и их опытной эксплуатацией, основные усилия сосредоточиваются на нормативном обеспечении разработки, строительства, испытаний и эксплуатации экранопланов, предназначенных для использования исключительно в пределах действия экранного эффекта.

На пути создания экранопланов встретились научно-технические затруднения, ряд из которых не преодолен и в настоящее время. Эти затруднения связаны главным образом с малой аналитической и экспериментальной практикой исследований гидроаэродинамики, динамики полета и теории оптимального проектирования экранопланов.

При создании экранопланов наибольший интерес представляют три проблемы:

- а) реализация высокого аэродинамического качества крыла (и экраноплана в целом) в конкретных конструкциях экранопланов;

- б) стабилизация экранопланов для различных величин клиренса при полете на экране;

- в) проблема мореходности и взлета/посадки экраноплана на волнении.

Впервые эти проблемы, как взаимовлияющие друг на друга, были сформулированы профессором А.Н Панченковым [3].

В экспериментальных исследованиях первых двух задач в аэродинамических трубах с изолированным крылом вблизи экрана получены очень высокие значения качества крыла. Однако реализовать высокое качество на натуральных аппаратах удается очень редко. Дело в том, что приведенные проблемы находятся в определенном противоречии, в результате чего аппараты, обладающие высоким качеством, оказываются неустойчивыми, и обеспечение их стабилизации приводит к падению качества.

В разных странах мира (США, Японии, Германии, Китае и т.д.) был предложен ряд схем экранопланов и проведены натурные исследования. Однако среди них трудно назвать хотя бы один проект, в котором рациональным образом совмещались два

необходимых качества - стабилизация и высокое аэродинамическое качество.

С точки зрения первой проблемы основная задача состоит в исследовании крыла, специальным образом приспособленного к полету на малых отстояниях, и выборе аэродинамической схемы, обеспечивающей высокое качество аппарата в целом.

Проблема обеспечения стабилизации экранопланов решается двумя путями:

- а) создание автоматической системы стабилизации;

- б) обеспечение самостабилизации экраноплана за счет выбора специальной геометрии несущих поверхностей и их компоновки в аэрогидродинамической схеме (аэродинамическая стабилизация).

Проблема взлета и посадки экраноплана внесла некоторые сложности в процесс его создания. Но это было характерно только для одного типа опорной поверхности (экрана) - воды. Вода оказалась наиболее сложным, неудобным видом экрана.

Генеральная стратегия создания экранопланов сегодня опирается на два фундаментальных факта:

1. Существует положительный эффект экрана - при движении крыла вблизи твердой границы существенно растет подъемная сила и снижается индуктивное сопротивление, так что аэродинамическое качество резко возрастает по сравнению с крылом самолета.

2. Поверхность воды является наиболее неблагоприятным видом экрана, значительно усложняющим взлет и посадку экранопланов и предъявляющим жесткие требования к их мореходности.

Эта генеральная стратегия на передний план выдвигает задачу поиска в концепции того или иного типа экраноплана компромисса между двумя антагонистическими качествами:

1. Положительное качество - эффект экрана

2. Отрицательное качество - трудности взлета и посадки с воды.

Второй задачей является задача выбора геометрии основного крыла.

В качестве третьей задачи выступает задача выбора конструктивных параметров аэродинамической схемы экраноплана.

Отрицательная компонента компромиссного концептуального решения выдвигает на передний план задачу конструирования эффективных взлетно-посадочных устройств экраноплана.

Сегодняшний период разработки экранопланов характеризуется слабым участием либо неучастием фундаментальной науки и ничтожно малым учетом результатов фундаментальных исследований. Что недопустимо для создания эффективных и перспективных типов экранопланов.

Предлагаемая авторами опытно-конструкторская разработка экраноплана-трансформера соответствует задачам Концепции развития экранопланостроения, направлена на решение указанных выше проблем и выполняется в рамках научно - исследовательской и опытно-конструкторской работы по исследованию и оптимизации базовой аэрогидродинамической схемы экраноплана-трансформера путем разработки, изготовления и натурных испытаний макетного

образца экраноплана-трансформера.

1. Направление исследований

Целью создания экраноплана – трансформера является создание лёгкого 2х-местного скоростного, амфибийного, катера - экраноплана - трансформера для круглогодичного индивидуального и служебного использования на реках, водоёмах и прибрежных морских акваториях Дальнего Востока и Арктики в отсутствие транспортной инфраструктуры. Разрабатываемое транспортное средство будет объединять несколько принципов движения, адаптированных к различным условиям эксплуатации: по льду, снегу, воде, над водой посредством его конструктивной трансформации в аэросани, аэроглиссер и экраноплан для обеспечения конкурентного преимущества на потребительском рынке индивидуального водного транспорта. Идея проекта основана на существующей технической возможности создания универсального скоростного амфибийного транспортного средства, использующего эффект динамического поддержания одновременно с другими способами скоростного движения:

- глиссирования по водной поверхности;
- скольжения по ледовой и заснеженной поверхности;
- полёта с использованием аэродинамического способа создания подъёмной силы;
- полёта с использованием эффекта динамического поддержания вблизи ровной поверхности (экрана).

До настоящего времени, несмотря на очевидные выгоды скоростного движения с использованием эффекта динамического поддержания и множество удачно реализованных проектов, ни один из действующих образцов не запущен в серийное производство и коммерческую эксплуатацию как это было при появлении первых судов на подводных крыльях в период 1950 – 1970-х годов. А базовая схема скоростного амфибийного транспортного средства, комплексно отвечающего требованиям эффективной эксплуатации в системе водного, воздушного и сухопутного транспорта, до сих пор ещё нигде не сформирована и не получила практического признания.

Ключевая новизна проекта заключается в создании транспортной скоростной амфибийной платформы универсального применения, использующей все основные виды скоростного амфибийного движения на основе следующих идей и технических решений:

Идея универсальности и функциональной адаптации транспортного средства для всесезонной эксплуатации с использованием конструктивной трансформации.

Концепция модульно-разборной конструкции в обеспечение трансформации.

Инновационные решения при построении аэрогидродинамической схемы экраноплана.

Инновационные решения при построении аэрогидродинамической схемы аэроглиссера.

Проект также должен обеспечить экспериментальную проверку и подтверждение научно-технических и конструкторско-технологических решений в обеспечение создания базовой схемы данной скоростной амфибийной платформы для снятия рисков и исключения сомнений будущих инвесторов в последующей коммерциализации результатов проекта.

Для обеспечения надёжности коммерциализации результатов проект будет ориентирован не только на государственную и региональную поддержку, но также на широкую ценовую, техническую и сертификационную доступность продуктов проекта для индивидуальных потребителей - физических лиц.

2. Объект исследований

Для решения поставленных задач и выполнения требований технического задания по созданию легкого 2х местного катера - экраноплана в части габаритных ограничений с возможностью модульно-конструктивной трансформации авторами данного проекта была разработана схема экраноплана - трансформера ЭТ-2. Данная схема обеспечивает вместимость 2х человек и позволяет базировать частично разобранный аппарат в стандартном автомобильном гараже, а также перевозить его в 20-футовом TEU морском контейнере и на автоприцепе.

Экраноплан ЭТ-2 представляет собой свободнонесущий моноплан нормальной самолетной схемы с высокорасположенным горизонтальным оперением (рис. 1). Корпус-фюзеляж выполнен из двух составных частей:

– водоизмещающей лодки силовой конструкции (1), со скуловыми обводами и палубой от носа до кормы. К бортам лодки крепятся консоли несущего крыла (4) с концевыми шайбами-поплавками (3) и два киля V-образной формы (6) с установленным сверху горизонтальным оперением (7), размах которого соизмерим с размахом несущего крыла;

– надстройки-кабины над палубой лодки (2), для размещения силовой установки и полезной нагрузки.

Несущее крыло (4) и водоизмещающая часть корпуса-фюзеляжа герметичны. В корпусе и крыле расположены отсеки непотопляемости, обеспечивающие нахождение экраноплана на плаву при нарушении герметичности 2-х смежных отсеков.

На концах крыльев вертикально установлены концевые шайбы с киями (3), а на киях оперения (6) и киях концевых шайб установлены рули-элероны для управления креном и курсом экраноплана.

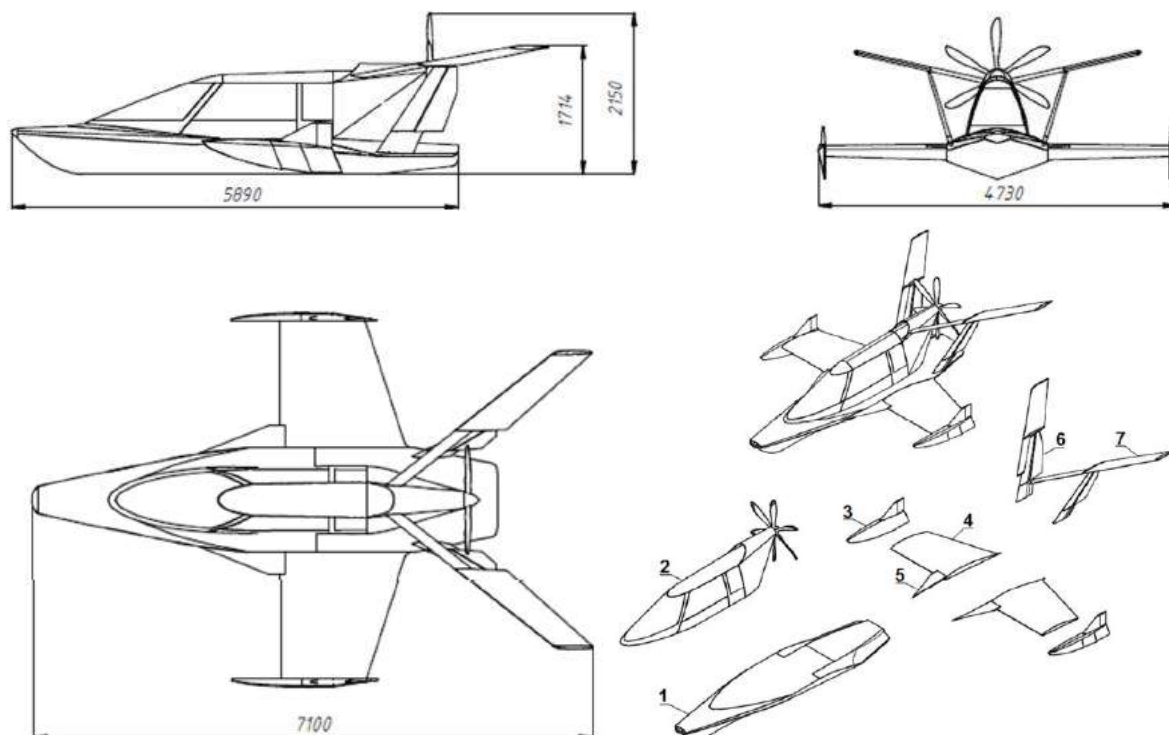


Рис. 1. Предварительная (базовая) аэродинамическая схема экраноплана - трансформера ЭТ-2.
 1 - водоизмещающая лодка; 2 - надстройка – кабина с силовой энергетической установкой; 3 - концевые шайбы крыла; 4 - крылья; 5 - подкрылки; 6 - вертикальное оперение (кили); 7 - горизонтальное оперение

В корпусе-фюзеляже и надстройке-кабине размещены: сиденье пилота, сиденье пассажира (груз) и отсек силовой установки (СУ) в хвостовой части. В носовом отсеке располагаются агрегаты радио и электрооборудования и авионика. Пассажирская кабина отделяется переборкой от отсека СУ. В кабине предусматриваются откидные двери - люки по бортам над передней частью крыла.

Маршевый двигатель (СУ) устанавливается в задней, сужающейся части палубной надстройки и соединяется через трансмиссию с воздушным винтом, размещённым над кормовой палубой между двухкилевым хвостовым оперением.

Кабина вмещает пилота и одного пассажира. Конструкция пассажирского кресла обеспечивает оперативный демонтаж.

Конструкция экраноплана предусматривает унифицированное модульное исполнение и обеспечивает его сборку и конструктивное быстроразъёмное разделение в условиях штатного базирования для трансформации в катер-аэроглиссер, транспортировки, технического обслуживания, ремонта и замены изношенных и аварийных узлов и агрегатов.

Для транспортировки с использованием собственного автомобиля предусматривается кильблоковая тележка-автоприцеп.

Технические характеристики полномасштабного образца ЭТ-2 в соответствии с техническим заданием:

- максимальный взлётный вес - 500 кг;
- предельные габариты по длине - 7,1 м;
- экипаж, мест (вес) - 1 пилот (до 90 кг);
- вместимость, мест (груз) - 1 пассажир (90 кг);

- скорость полёта на экране - 100 ± 150 км/ч;
- параметры мореходности: допустимая высота волны при взлётно-посадочном режиме - $0,4 \pm 0,5$ м; допустимая высота волны крейсерского полета на экране - 1,0 м;
- дальность полёта на экране при полной загрузке - более 300 км.

3. Методика и программа исследований

Исследования проводились методом сравнения результатов продувок в аэродинамических трубах и 3D моделирования с использованием современных компьютерных программ построения математических моделей различных вариантов аэрогидродинамических (АГД) схем трансформаций ЭТ-2 и программы ANSYS «Виртуальная аэродинамическая труба». 3D моделирование выполнялось на базе предприятия - соисполнителя, ООО «Союзмортранс» в рамках его совместных работ, и договорных отношений с институтом математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета (СГАУ) им. ак. С.П. Королёва.

Для аэротрубных испытаний в трубе СГАУ в соответствие с установленными требованиями был изготовлен аэротрубный макет ЭТ-2 с габаритами 602 x 400 x 144 (мм), площадью лобового сопротивления 146 см² и весом 677 грамм (рис. 2). Продувки аэротрубной модели ЭТ-2 проводились в аэродинамической трубе Т-3 СГАУ с размерами рабочей части: 1000 x 600 x 400 мм (рис. 3). Измерения проводились при скорости потока 25 м/сек с использованием шестикомпонентных аэродинамических тензочувствительных весов и рычажной подвески модели.



Рис. 2. Аэротрубная модель ЭТ-2



Рис. 3. Продувка аэротрубной модели ЭТ-2

Исследования, проведённые в аэродинамической трубе Т-3 СГАУ показали, что использование данного инструмента не даёт достоверных результатов во всем диапазоне скоростей воздушного потока (рис. 4).

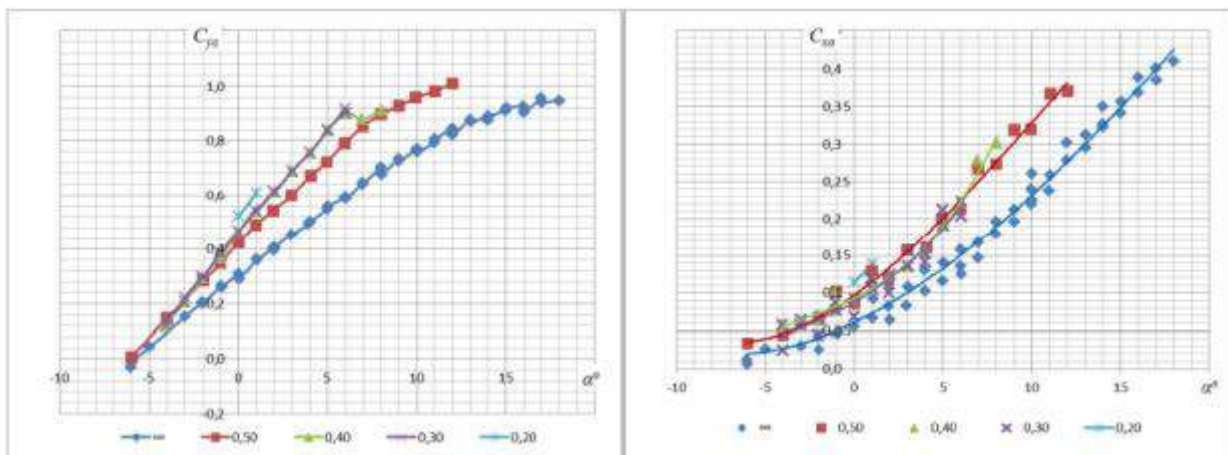


Рис. 4 Результаты измерений коэффициентов подъемной силы, C_p и лобового сопротивления C_x при разных отстояниях h' от экрана в аэродинамической трубе Т3 СГАУ

Измерения проводились при максимальной скорости воздушного потока 25 м/сек с использованием шестикомпонентных аэродинамических тензочувствительных весов и рычажной подвески модели. На меньших скоростях потока и при использовании жёсткого экрана показания тензочувствительных весов были неоднозначны и не позволяли проводить измерения по программе испытаний в широком диапазоне скоростей. Вероятной причиной недостоверности измерений является необходимость корректной калибровки тензочувствительных весов и самой схемы эксперимента.

Также проводилось исследование, расчёты и 3D моделирование продольных аэродинамических характеристик C_p , C_x , C_a модели и их зависимостей от угла атаки крыла α , тангажа α_t ($-1^\circ \div 6^\circ$) и относительной высоты (относительного отстояния) модели от экрана, h' (0,15; 0,2; 0,3; 0,5 \div 1,0).

Программно-математическое моделирование проводилось с использованием программы ANSYS «Виртуальная аэродинамическая труба» и её программных модулей:

- ICEM CFD - «виртуальная аэродинамическая труба» с генерацией геометрии сетки;
- Fluent - математические расчёты;
- SFD-Post - визуализация полей давления и линий тока.

В качестве исходной базовой модели для расчётов использовалась аэротрубная виртуальная модель ЭТ-2 с двухкилевым оперением, без предкрылков, разработанная в 3D графике (файл 6.2 iprt Autodesk Inventor (Pro) 2019 с форматом передачи данных - igs). Перекодированная 3D модель (рис. 5) имеет следующие характерные параметры: 14 - трапециевидное крыло: $\bar{c}_0 = 8\%$, $b_0 = 1,6$ м, $\lambda = 2,95$, $\alpha = 5^\circ$, $S_{кр} = 7,0$ м²; - габариты: 7,1 x 4,73 x 1,71 м, при длине лодки 5,89 м. В рамках программно-математического моделирования проводилось определение продольных аэродинамических характеристик C_p , C_x , C_a , для положений 3D модели с разными углами тангажа вблизи экрана и вне его влияния для оценки несущих способностей, лобового сопротивления и аэродинамического качества модели:

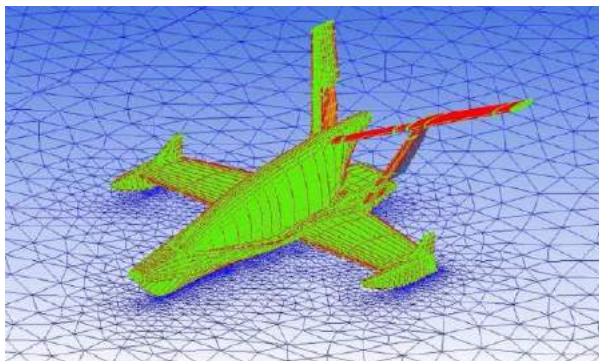


Рис. 5. Перекодированная 3D модель

В рамках программно-математического моделирования проводилось определение продольных аэродинамических характеристик C_y , C_x , Ka , для положений 3D модели с разными углами тангажа вблизи экрана и вне его влияния для оценки несущих способностей, лобового сопротивления и аэродинамического качества модели:

$$Y = C_y S_{кр} \rho V^2 / 2 - \text{подъёмная сила (1)}$$

$$Q_x = C_x S_{кр} \rho V^2 / 2 - \text{лобовое сопротивление (2)}$$

$$Ka = Y_a / X_a = C_y / C_x - \text{аэродинамическое качество (3)}$$

Моделирование проводилось при скоростях воздушного потока $V = 25 - 40$ м/сек, что соответствует значениям числа $Re = (2,72 - 4,35) \cdot 10^6$ по корневой хорде крыла $b_0 = 1,6$ м.

В качестве характерной высоты бралось расстояние от задней кромки крыла корневой хорды до экрана.

Относительная высота (отстояние) до экрана h'

определялась по отношению к корневой хорды b_0 крыла модели и составляла (0,15; 0,2; 0,3; 0,5 - 1,0).

Тангаж ($\alpha = -1^\circ \div 6^\circ$) отсчитывается от основной линии ОЛ (килевой и ватерлинии). При расчётах в программном модуле ANSYS Fluent, кроме реальных масштабов и пространственной геометрии 3D модели учитывались параметры: температуры, плотности и кинематической вязкости воздуха (T° , ρ , ν). Также учитывались поправки на влияние свободных границ и параметры, моделирующие влияние близости экрана. Программный модуль SFD Post позволял визуализировать поля давлений и линий тока (рис. 6).

Полученные в результате математического моделирования аэродинамические характеристики базовой модели экраноплана - трансформера ЭТ-2 $C_y = f(\alpha^\circ, h')$, $C_x = f(\alpha^\circ, h')$, $Ka = f(\alpha^\circ, h')$ показывают (рис. 7), что изменение отстояния от экрана оказывает типичное влияние на аэродинамические характеристики модели. При фиксированном угле тангажа α° с уменьшением h' возрастают коэффициенты подъемной силы C_y при малых изменениях лобового сопротивления в сторону уменьшения за счёт снижения индуктивного сопротивления несущих поверхностей вблизи экрана, что вполне соответствует теории. При минимальном отстоянии в горизонтальном полёте $h' = 0,15$ аэродинамическое качество базовой модели достигает максимального значения $Ka_{max} = 15,1$. Для маленького двухместного аппарата это хороший показатель с учётом того, что самолёты малой авиации в благоприятных условиях на рабочем эшелоне едва достигают значений $Ka = 12 - 13$.

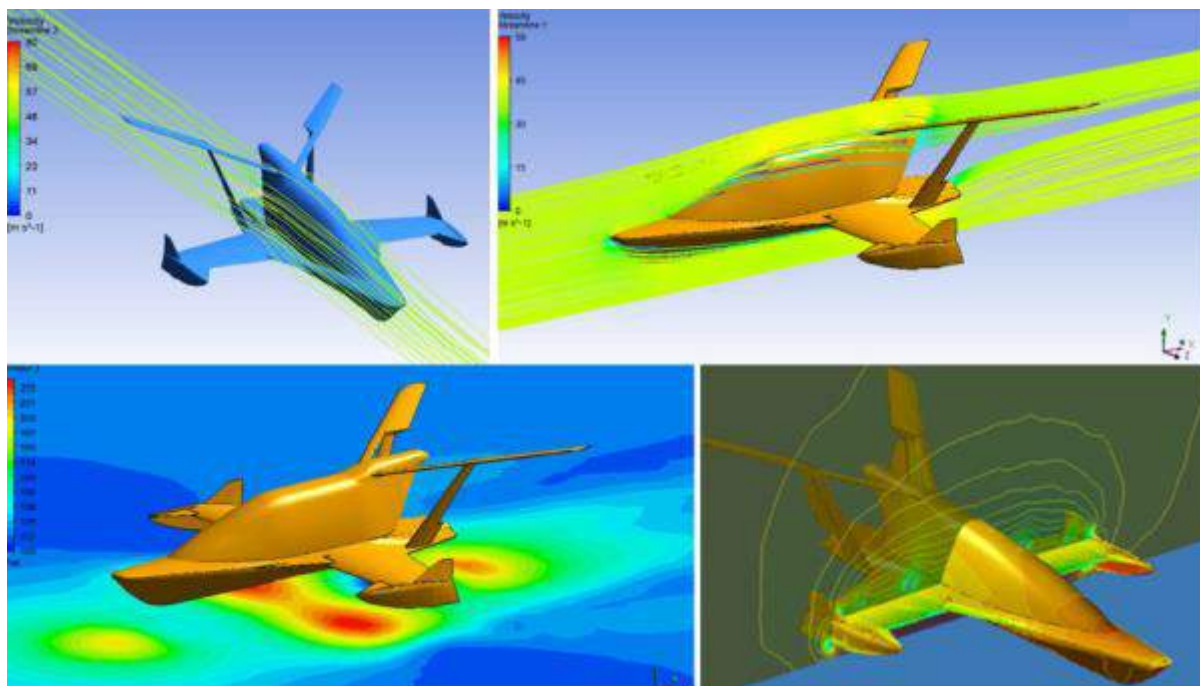


Рис. 6. Визуализация полей давлений и линий тока в программном модуле SFDPost

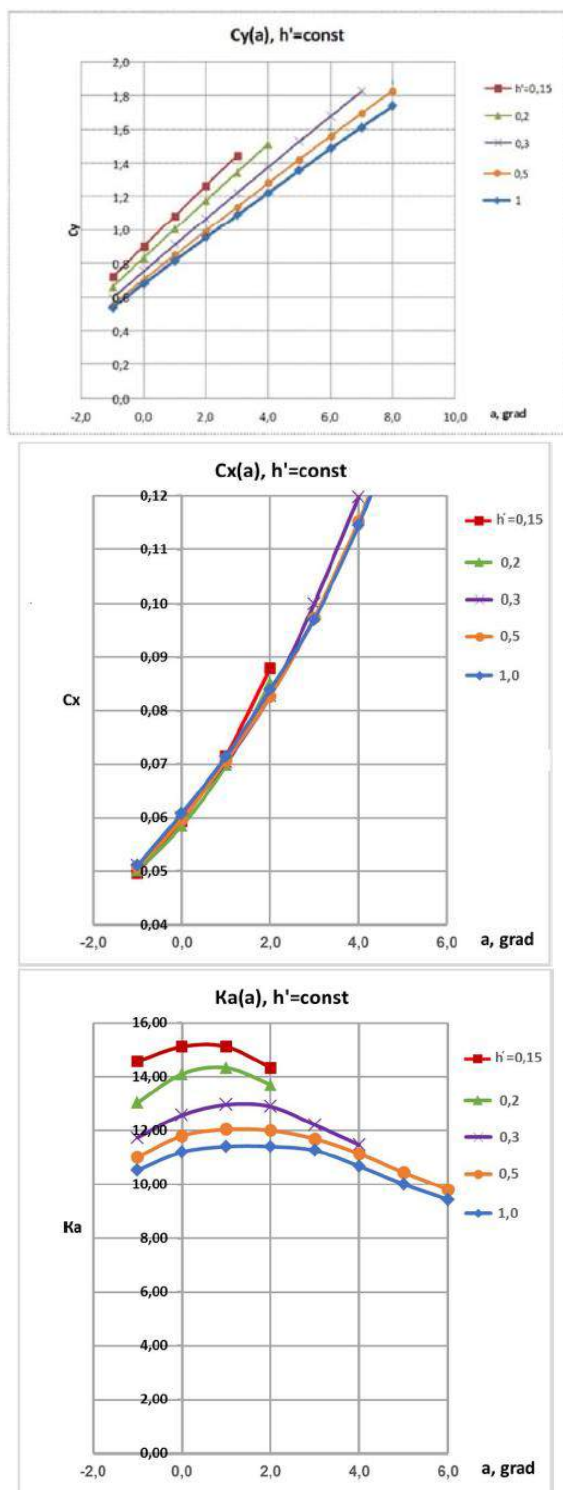


Рис. 7. Аэродинамические характеристики базовой модели экраноплана - трансформера ЭТ-2 $C_y=f(\alpha^\circ, h')$, $C_x=f(\alpha^\circ, h')$, $K_a=f(\alpha^\circ, h')$

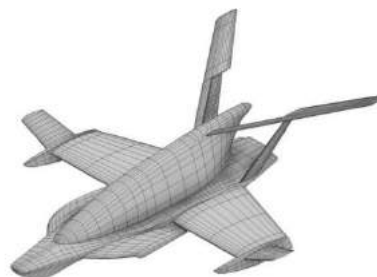


Рис. 8. 3D модель ЭТ-2 после оптимизации

Были выполнены работы по оптимизации и достижению максимального аэродинамического качества модели: определение эффективного угла атаки крыла; оптимизация аэродинамической формы кабины; оптимизация аэродинамической формы и положения законцовок («ушей») крыла; оптимизация положения и аэродинамической формы корпусных (центропланнх) предкрылков и щитков; оптимизация элементов аэродинамического управления полётом и маневрированием модели. Исследования проводились при скоростях потока $V = 14 - 40$ м/сек. Характеристики температуры, плотности, вязкости и других параметров воздушного потока использовались в соответствии с требованиями технического задания.

Для определения аэродинамических характеристик макетного образца радиоуправляемой модели экраноплана были выполнены расчёты в программе ANSYS при аналогичных условиях отстояния от экрана. Размеры макетного образца определены требованиями технического задания проекта, что соответствует 4-х кратному уменьшению габаритов оптимизированной схемы экраноплана-трансформера. Ограничение по размаху крыльев соответствует габаритным ограничениям аэродинамических труб Крыловского государственного научного центра имени академика А.Н. Крылова и Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева для возможности проведения последующих проверочных аэротрубных испытаний. Параметры мореходности, дальности и остальные характеристики будут определены по результатам проектирования, моделирования, лабораторных, стендовых и натурных испытаний макетного образца ЭТ-2.

Были проведены предварительные исследования гидроаэродинамических схем аэроглизсера (рис. 8, 9, 10), представляющего собой трансформерную модификацию экраноплана-трансформера ЭТ-2 с условным названием ЭТ-2А, образованную исключением (отсоединением) из АГД схемы крыльевых консолей по линии предкрылков и заменой горизонтального оперения.

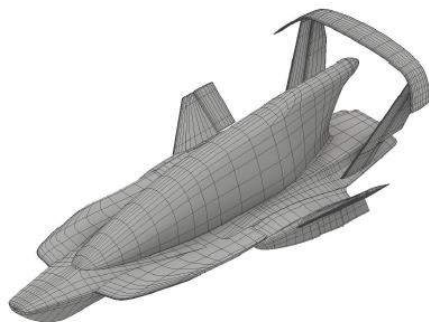


Рис. 9. 3D модель аэроглиссера ЭТ-2А

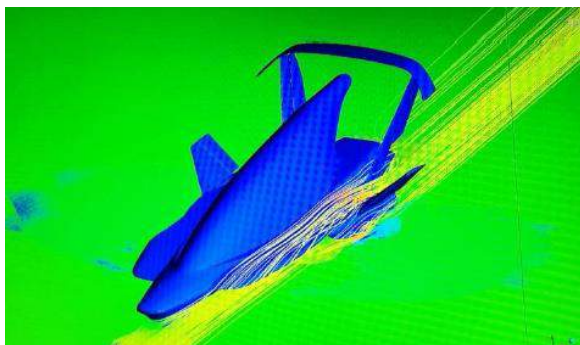


Рис. 10. Продувки ЭТ-2А в программе ANSYS

4. Основные результаты исследований

Результаты исследований показали:

1. Сопоставимость некоторых результатов измерений в аэродинамической трубе Т-3 СГАУ с расчётными результатами математического 3D моделирования.

2. Недостоверность, сложность и неоперативность получения результатов аэродинамических измерений и продувок в малых аэротрубках.

3. Оптимальный угол атаки крыла для АГД схемы модели близок к 4° .

5. Выбрана оптимальная геометрия предкрылка.

6. Законцовки крыла модели с V-образным отклонением (уши), являясь своеобразной консолью, продолжающей удлинение крыла, увеличивают аэродинамическое качество, подъёмную силу и поперечную устойчивость модели.

7. Традиционное конструктивное исполнение элеронов руля высоты и поворотных лопастей килей направления вносит значительный вклад в лобовое сопротивление модели, уменьшая аэродинамическое качество до 2,77%, за счёт щелей и больших зазоров. Использование цельноповоротного конструктивного исполнения элементов управления полётом и маневрированием является наиболее целесообразным.

8. Максимальное аэродинамическое качество K_a , достигнутое по результатам исследований и оптимизации АГД схемы модели при обеспечении требований технического задания по взлётному весу, габаритам и скорости полёта на экране полномасштабного образца составило в трансформации «экрanoплан» - 20,16, а в трансформации «аэроглиссер» - 8,14.

Проведённые исследования дают основания предполагать, что потенциальные возможности рассматриваемой АГД схемы не исчерпаны и

существует возможность дальнейшего увеличения её аэродинамического качества, несмотря на относительно малые габариты образца.

Данные результаты являются достаточным основанием для перехода к выполнению работ второго этапа проекта по разработке эскизной конструкторской документации и технологической подготовке изготовления макетного радиоуправляемого образца ЭТ-2.

Заключение

В результате проделанных работ первого этапа проекта решены следующие задачи:

1. Разработаны 3D модели макетного образца ЭТ-2 с использованием трёхмерной инженерной графики на базе современного программного обеспечения (всего более 40 моделей).

2. Выполнены исследования основных аэродинамических характеристик базовой схемы экраноплана-трансформера ЭТ-2 и определены их основные значения с использованием предварительных продувок аэротрубных моделей в аэродинамических трубах и с использованием программно-математического 3D моделирования.

3. Выполнена оптимизация базовой аэрогидродинамической схемы ЭТ-2 и отдельных её элементов, значительно улучшающая основные аэродинамические показатели.

4. Определено, что с использованием предкрылков и крыльевых законцовок особой конструкции аэродинамическое качество схемы увеличивается (в данной работе на 27,2% до значения $K_a = 19,21$ с уменьшением коэффициента лобового сопротивления C_x от 0,059 до 0,043, т.е. на 27,9%).

5. Установлено, что для улучшения аэродинамики возможна и целесообразна оптимизация конструкции рулевых элементов хвостового оперения.

6. Определены предварительные аэродинамические характеристики и технической облик трансформерной модификации аэроглиссера ЭТ-2А. Подтверждено наличие несущих способностей схемы и действие эффекта динамического поддержания с ростом подъёмной силы до величин, превышающих половину его водоизмещения. Можно предполагать, что на данный момент представляется маловероятным существование аналогов подобных аэрогидродинамических схем и способов скоростного амфибийного движения. Сам аэроглиссер при грамотном техническом исполнении, соответствующем маркетинге и ценовой политике будет пользоваться не меньшим спросом, чем экраноплан-трансформер, выполненный на его конструктивной базе.

7. Выполнены расчёты лётно-технических и конструктивных характеристик макетного образца в масштабе 1:4 от базовой схемы ЭТ-2. Разработаны технические требования для проектирования эскизной конструкторской документации по его изготовлению на последующих этапах проекта.

9. В дополнение к проведённым исследованиям необходимо выполнить оценки продольной устойчивости ЭТ-2 и ЭТ-2А, а также провести исследования их гидродинамических характеристик на режимах скоростного водоизмещающего

движения перед взлетом с использованием программно-математического 3D моделирования.

10. По результатам математического моделирования определена целесообразность

проведения лабораторно-стендовых и натуральных морских испытаний для подтверждения расчётов.

Литература

1. Концепция «Развития экранопланостроения в Российской Федерации» от 27.06.2019, Минпромторг России, Москва, 2019 – 34 с.
2. Konstantin V. Gribov, Gennady A. Fedoreev, The concept of selection of aerodynamic schemes of ekranoplans for transport corridors of the Arctic. TEAM 2018, 32-th. - The 32nd Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Wuhan University of Technology, 15-18 October, 2018, Wuhan, China, p. 9-23;
3. Панченков А.Н., Драчев П.Т., Любимов В.И. Экспертиза экранопланов. Н.Новгород. ООО "Типография "Поволжье", 2006- 656 с.;
4. Правила классификации и постройки малых экранопланов типа А. Российский Морской Регистр Судоходства, Санкт-Петербург, 1998- 66 с.;
5. Решетов. Н. А., Евенко В. И. Безопасность экранопланов — разработка международных требований Судостроение 2002 №6 стр 9-10

References

1. Концепція «Razvitija jekranoplanostroenija v Rossjskoj Federacii» [Concept "Development of ekranoplanostroeniya in the Russian Federation"] at 27.06.2019, Minpromtorg Rossii, Moskva, 2019 – 34 s.;
2. Konstantin V. Gribov, Gennady A. Fedoreev, The concept of selection of aerodynamic schemes of ekranoplans for transport corridors of the Arctic. TEAM 2018, 32-th. - The 32nd Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Wuhan University of Technology, 15-18 October, 2018, Wuhan, China, p. 9-23;
3. Panchenkov A.N., Drachev P.T., Ljubimov V.I. Jekspertiza jekranoplanov [Expertise of ekranoplanes]. N.Novgorod. ООО "Типографія "Povolzh'e", 2006.- 656 s.;
4. Pravila klassifikacii i postrojki malyh jekranoplanov tipa A. Rossijskij Morskoy Registr Sudohodstva, Sankt-Peterburg [Rules for the classification and construction of small ekranoplanes of type A. Russian Maritime Register of Shipping], 1998.- 66 s.;
5. Reshetov. N. A., Evenko V. I. Bezopasnost' jekranoplanov — razrabotka mezhdunarodnyh trebovanij [Safety of ekranoplans, development of international requirements], Sudostroenie 2002 №6 str 9-10.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Константин Викторович Грибов, кандидат технических наук, доцент отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Россия, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: gribov.kv@dvfu.ru

Геннадий Александрович Федореев, генеральный директор Союзмортранс, руководитель Дальневосточного отделения Российского научно-технического общества судостроителей им. ак. А.Н. Крылова, 690091, Россия, Приморский край, г. Владивосток, ул. Семёновская, 10, офис 1, e-mail: stt@mail.primorye.ru

Алексей Юрьевич Журенко, ведущий конструктор Союзмортранс, 690091, Россия, Приморский край, г. Владивосток, ул. Семёновская, 10, офис 1, e-mail: stt@mail.primorye.ru

Konstantin V. Gribov, Ph.D. (Eng), associate professor of Department of mechanical engineering, marine engineering and transport, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, Russky Island, Vladivostok, Primorsky Territory, Russian Federation, 690922, e-mail: gribov.kv@dvfu.ru

Gennady A. Fedoreyev, general director Soyuzmortrans, head of the Far Eastern Branch of the Russian Scientific and Technical Society of Shipbuilders named after ac. A.N. Krylova, #1, 10 Semyonovskaya St, Vladivostok, 690091, Russia, Primorsky Territory, e-mail: stt@mail.primorye.ru

Alexey Y. Zhurenko, lead designer of Soyuzmortrans LLC, #1, 10 Semyonovskaya St, Vladivostok, 690091, Russia, Primorsky Territory, e-mail: stt@mail.primorye.ru

Поступила в редакцию: 15.08.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

Влияние особенности компоновки корпуса тримарана на его гидродинамическое сопротивление

А.Э. Корепанов¹, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород

Аннотация. В статье отражена история, состояние развития и сложившаяся тенденция применения аутригеров. Показано как сформировалась терминология по судам данного типа. В статье затронута тема влияния расположения аутригеров на гидродинамическое сопротивление тримарана. Целью работы является получение методики для нахождения гидродинамического сопротивления тримарана. Состояние данного вопроса на сегодня недостаточно изучено т.к. нет четкого ответа при какой схеме по длине и ширине судна необходимо располагать аутригеры для того, чтобы судно могло включить в себя все возможные положительные качества. На основании анализа полученных данных модельных испытаний были построены графики зависимости гидродинамического сопротивления от числа Фруда которые показывают влияние расположения аутригеров по длине и ширине относительно центрального корпуса на гидродинамическое сопротивление тримарана. Сделаны выводы о влиянии размеров аутригеров и их расположения относительно центрального корпуса тримарана на его гидродинамическое сопротивление.

Ключевые слова: Аутригер, проа, катамаран, тримаран, интерференция волн, модельные испытания, опытовый бассейн, расположение аутригеров, поправочный коэффициент влияния.

The influence of the layout features of the trimaran hull on its hydrodynamic resistance

Alexey E. Korepanov¹ e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The article reflects the history, state of development and current trends in the use of outriggers. It is shown how the terminology for vessels of this type was formed. The article touches on the topic of the influence of the location of outriggers on the hydrodynamic resistance of the trimaran. The aim of the work is to obtain a methodology for determining the hydrodynamic resistance of a trimaran. The state of this issue has not been sufficiently studied to date, since there is no clear answer according to which scheme for the length and width of the vessel it is necessary to place outriggers so that the vessel includes all possible positive qualities. Based on the analysis of the obtained model test data, graphs of the dependence of hydrodynamic resistance on the Froude number were constructed, which show the influence of the location of outriggers along the length and width relative to the central body on the hydrodynamic resistance of the trimaran. Conclusions are drawn about the influence of the size of outriggers and their location relative to the central body of the trimaran on its hydrodynamic resistance.

Key words: Outrigger, proa, catamaran, trimaran, wave interference, model tests, experimental pool, location of outriggers, correction factor of influence.

Введение

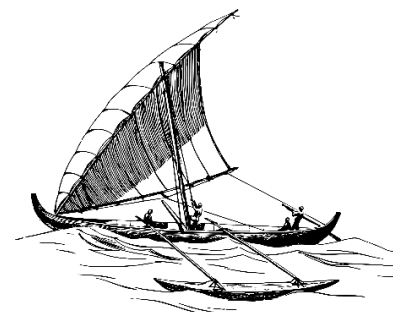
Основной особенностью влияния компоновки корпуса тримарана на его гидродинамическое сопротивление [1, 2, 3] является расположение аутригеров [4, 5] относительно его центрального корпуса по длине и ширине.

Аутригер – дословно переводится как выносная опора, выносной элемент¹. В судостроении аутригеры нашли свое применение на многокорпусных судах [6, 7], где нужно обеспечить необходимый уровень остойчивости судна и других мореходных качеств [8]. И так, аутригер – это дополнительный корпус судна, который соединяется с основным корпусом с помощью балок или моста.

Аутригер в первые был применен почти 4000 лет назад на парусных судах народов Полинезии в Тихом океане. Он представлял из себя выносной за борт очень узкий, длинный, так называемый «балансир», на котором были установлены уключины для весел, для удобства гребли.

В начале на судне применялся один аутригер, и такие суда назывались проа, но в этом случаи проблемы с остойчивостью были исключены не в

полной мере. Для решения этой проблемы спустя время люди начали применять конструкцию катамаранного типа, где два основных корпуса были соединены балками, и затем тримаранного типа, у которых в качестве основного корпуса был центральный и два аутригера с левого и правого борта (рис. 1).



¹ <http://yacht-com.ru/catalog/item77.html>

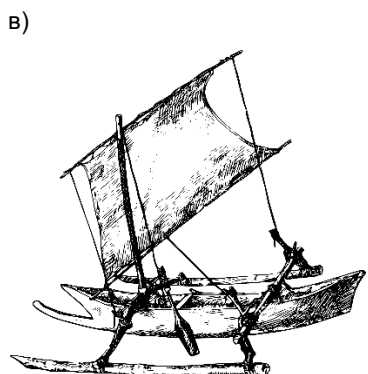
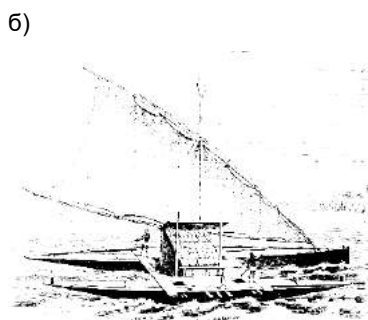


Рис. 1. Тип многокорпусного судна: а) проа; б) катамаран; в) тримаран

В процессе эволюции в зависимости от назначения и условий эксплуатации тримараны конструктивно совершенствовались и это прежде всего касалось аутригеров, их размеров и расположения.

В настоящее время суда-тримараны имеют большое разнообразие расположений аутригеров по длине и ширине судна относительно центрального корпуса, что приводит к различному архитектурному виду судна (рис. 2).

Применение аутригеров на судах-тримаранах стало следствием их положительного влияния на:

- снижение интенсивности волнообразования;
- повышение мореходных качеств судна;
- увеличение площади палуб;
- интерференцию волн;
- существенное снижение сопротивления судна.

а)



б)



в)



Рис. 2. Расположение аутригеров по длине тримарана относительно центрального корпуса: а) носовое расположение аутригеров; б) центральное расположение аутригеров; в) кормовое расположение аутригеров

На сегодня нет четкого ответа, позволяющего определять при какой схеме по длине и ширине судна необходимо располагать аутригеры для того, чтобы судно могло иметь все возможные положительные качества. Разработка такой методики с точки зрения обеспечения наименьшего гидродинамического сопротивления тримарана, составляет актуальную задачу проектирования этого типа судов.

Методы и результаты

Для выяснения данного вопроса были проведены модельные испытания в опытовом бассейне [9], где выяснялось влияние расположения аутригеров судна по длине и ширине на его гидродинамические характеристики. Варьировалась скорость хода тримарана в диапазоне $F_{TL}=0.3-1.6$ при отношении $L/V_{ц.к.}=11-23$ (где $L, V_{ц.к.}$ – расчетные длина и ширина центрального корпуса) с различным положением аутригеров по длине и ширине относительно центрального корпуса судна (рис. 3).

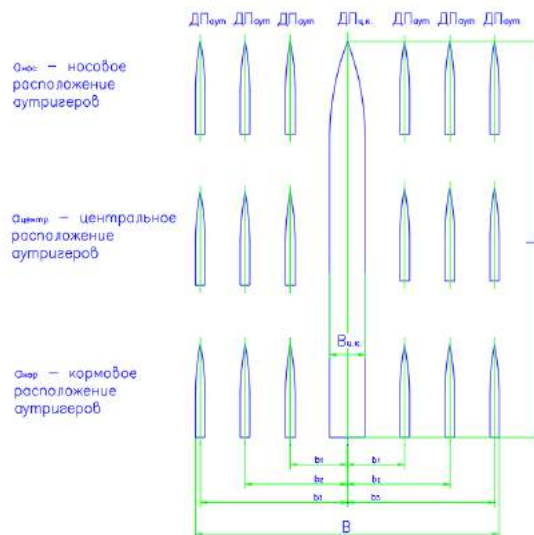


Рис. 3. Схема расположения аутригеров на модельных испытаниях по длине и ширине относительно центрального корпуса судна

Испытания проводились при трех различных положениях аутригеров по длине – носовое, центральное и кормовое (рис. 4).

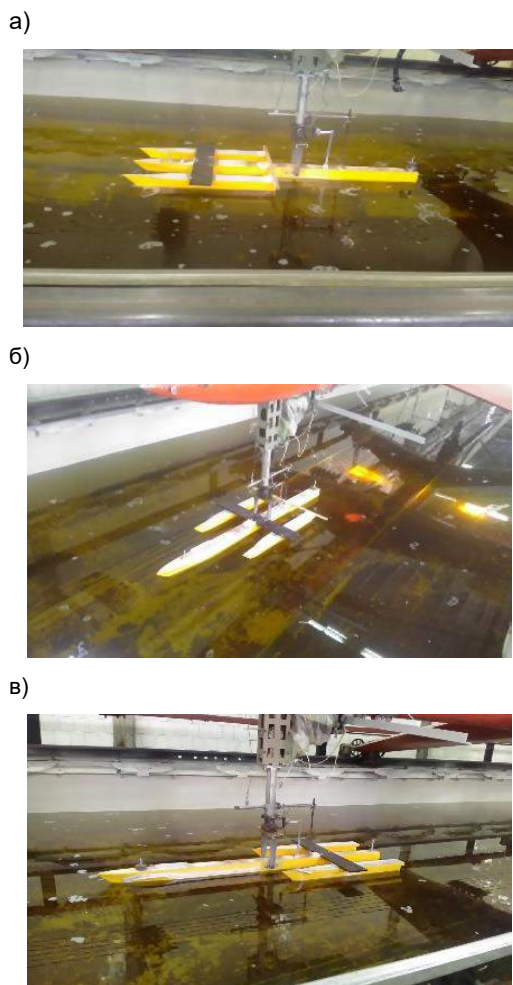


Рис. 4. Положение аутригеров по длине: а) носовое; б) центральное; в) кормовое

При каждом из этих положений варьировалось отстояние аутригеров по ширине от центрального корпуса. Вариации задавались параметром b_i/V (где b_i – расстояние между диаметрными плоскостями аутригера и центрального корпуса; V – ширина тримарана). Диапазон варьируемого параметра составлял $b/V=0.19-0.48$. При каждом прогоне модели на тихой воде фиксировалась в установившемся режиме хода скорость буксировки, сопротивление движению модели и параметры ее посадки. Результаты после обработки представлялись в виде графиков зависимостей $R=f(Fr_L)$ (рис. 5, 6, 7).

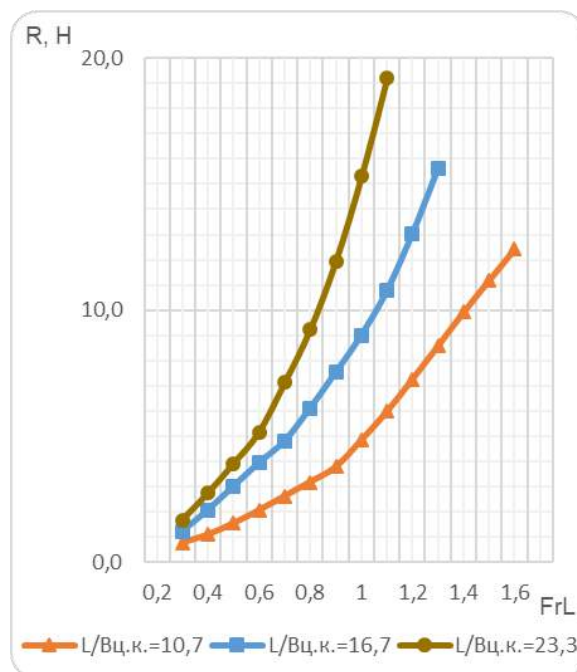


Рис. 5. Сопротивление модели судна-тримарана при носовом расположении аутригеров

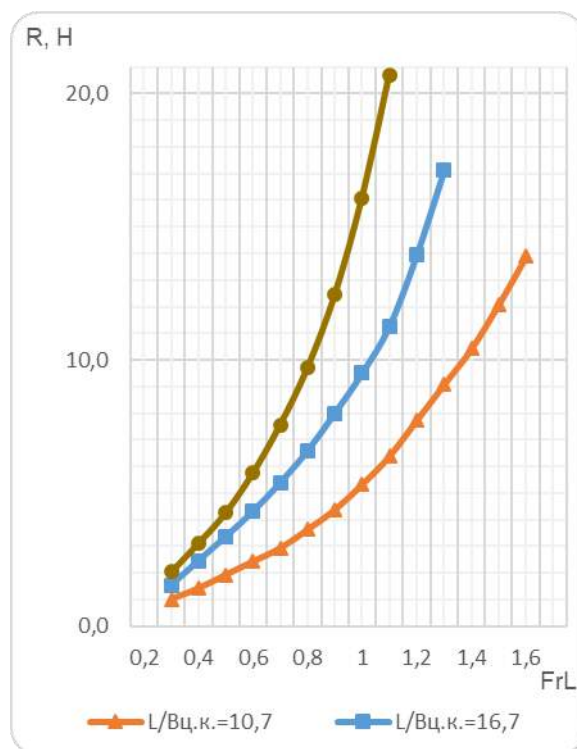


Рис. 6. Сопротивление модели судна-тримарана при центральном расположении аутригеров

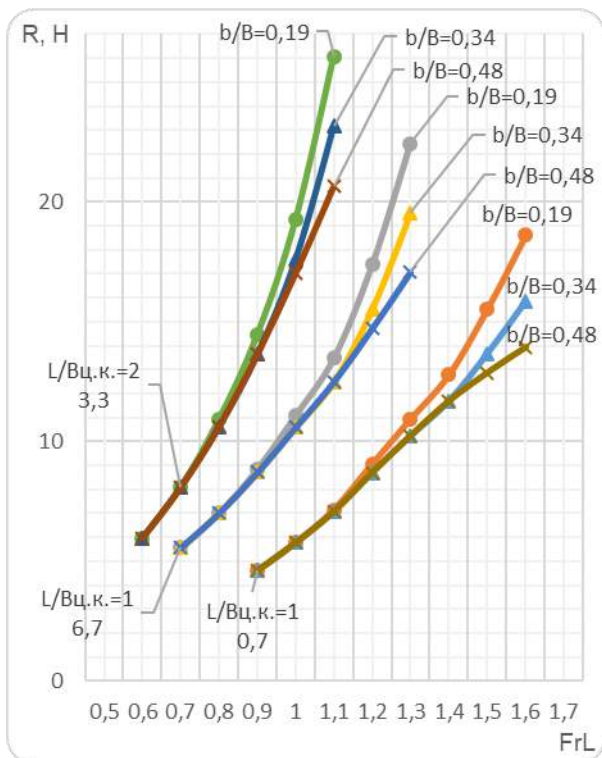


Рис. 7. Влияние кормового расположения аутригеров по ширине судна

При расположении аутригеров ближе к корме происходит увеличение гидродинамического сопротивления, как следствие неблагоприятной интерференции волн [10]. В качестве примера на рисунке 8 показано влияние расположения аутригеров по длине судна при $L/V_{ц.к.}=23,3$.

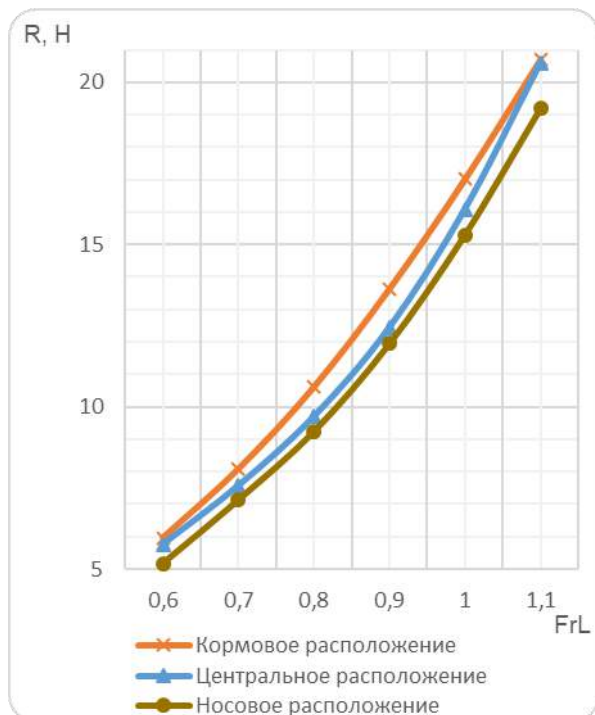


Рис. 8. Влияние расположения аутригеров по длине судна при $L/V_{ц.к.}=23,3$

По результатам модельных испытаний был найден поправочный коэффициент влияния (K_n) на сопротивление движению тримарана в зависимости от выбранной компоновки тримарана.

Поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го расположения аутригеров представляет собой соотношение сопротивлений судна-тримарана:

$$K_{ni} = R_i / R_6 \quad (1)$$

где, R_i – сопротивление судна-тримарана при соответствующем i -ом расположении аутригеров;
 R_6 – базовое сопротивление судна-тримарана, которое равно:

$$R_6 = R_{ц.к.} + 2 \times R_{аут} \quad (2)$$

где, $R_{ц.к.}$ – базовое сопротивление центрального корпуса;

$R_{аут}$ – базовое сопротивление аутригера.

За базовое сопротивление судна-тримарана принимается сумма сопротивления изолированного центрального корпуса тримарана и изолированного корпуса аутригера.

В качестве примера ниже на рисунке 9 приведен один из полученных графиков зависимости $K_n = f(v)$.

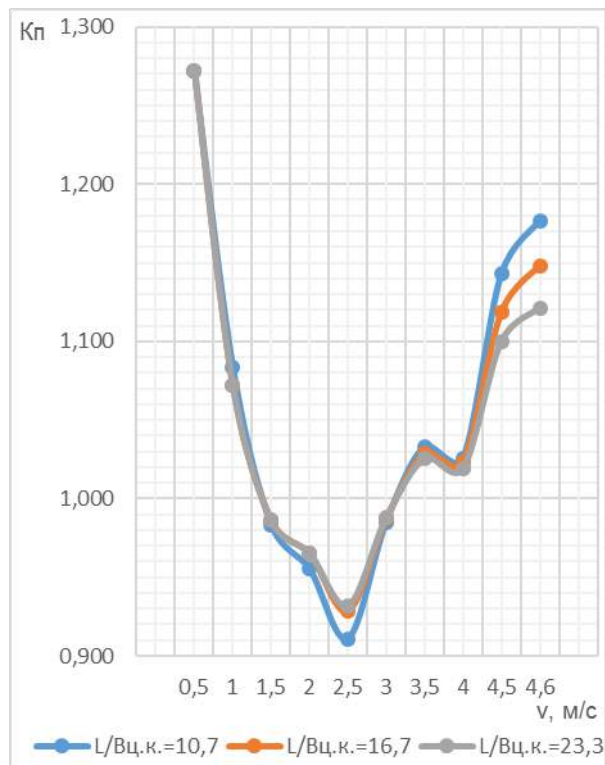


Рис. 9. Поправочный коэффициент при кормовом расположении аутригеров и отношении $b/B=0,34$

Закключение

Проанализировав данные модельных испытаний, были сделаны следующие выводы:

- влияние аутригеров разных размеров (в диапазоне объемного водоизмещения 15% - 33% от общего погруженного объема судна) на центральный корпус одного и того же относительного удлинения

слишком мало и не проявляется в значительном увеличении или уменьшении сопротивления судна;

- влияние расположения аутригеров относительно центрального корпуса судна-тримарана сказывается сильно, а именно:

1. При перемещении аутригеров ближе к носовой части центрального корпуса, сопротивление судна-тримарана снижается;

2. При различном расположении аутригеров по ширине относительно центрального корпуса в центральной и носовой части судна, сопротивление

тримарана никак не изменяется, что нельзя сказать про расположение аутригеров в кормовой части тримарана;

3. При расположении аутригеров относительно центрального корпуса в кормовой части при его удалении от центрального корпуса по ширине сопротивление судна уменьшается.

В целом полученные результаты модельных испытаний позволят получить методику расчета гидродинамического сопротивления воды движению тримарана.

Литература

1. Войткунский Я. И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988, 288 с.
2. Камил М. С. Вычисление волнового сопротивления тримарана методом конечного корня. Морской вестник, 2014, № 4 (52), 117–119 с.
3. Elcin Z. Wave making resistance characteristics of trimaran hulls: Master of Science Thesis. Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2003, 92 p.
4. Роннов Е. П., Корепанов А.Э. Тримараны: состояние и перспективы развития. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, 2019, № 60, 91–96 с.
5. Wang Z., Lu X., Zhan J. New development on the investigation of high speed trimaran hydrodynamics and hull form. Journal of Ship Mechanics, 2011, Vol. 15, Is. 7, 813–826 p.
6. Рахматуллин Р. Р., Месропян А.В. От монокорпуса к тримарану. Морской вестник, 2019, № 2 (70), 16–17 с.
7. Корытов Н. Тримараны нового поколения. Катера и яхты, 2005, № 196, 66–69 с.
8. Демидюк А. В., Тонюк В. И. Экспериментальное определение гидродинамических и кинематических характеристик продольной качки тримарана. Вісн. Одес. нац. мор. ун-ту, 2007, № 23, 81–88 с.
9. Михайлов В. И., Федосов К. М. Планирование экспериментов в судостроении. Л.: Судостроение, 1978, 160 с.
10. Роннов Е.П., Корепанов А.Э. Вопросы прогнозирования сопротивления движению судов-тримаранов. Труды 22-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки-2020», Н. Новгород: ВГУВТ, 2020, Вып. 9, 1–4 с.

References

1. Voitkunsii Ya. I. Soprotivlenie dvizheniyu sudov [Resistance to the movement of ships]. L.: Sudostroenie, 1988, 288 s.
2. Kamil M.S. Vychislenie volnovogo soprotivleniya trimarana metodom konechnogo kornya [Calculation of the wave resistance of the trimaran by the finite root method]. Morskoi vestnik, 2014, №4 (52), 117–119 s.
3. Elcin Z. Wave making resistance characteristics of trimaran hulls: Master of Science Thesis. Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2003, 92 p.
4. Ronnov, E. P., Korepanov A.E. Trimarans: state and prospects of development [Trimarans: state and prospects of development]. Bestnik Voljskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta, 2019, № 60, 91–96 s.
5. Wang Z., Lu X., Zhan J. New development on the investigation of high speed trimaran hydrodynamics and hull form. Journal of Ship Mechanics, 2011, Vol. 15, Is. 7, 813–826 p.
6. Rakhmatullin, R.R., Mesropyan A.V. Ot monokorpusa k trimaranu [From monocorpus to trimaran]. Morskoi vestnik, 2019, № 2 (70), 16–17 s.
7. Korytov, N. Trimarany novogo pokoleniya [New generation trimarans]. Katera i yakhty, 2005, № 196, 66–69 s.
8. Demidyuk, A.V., Tonyuk V.I. Eksperimental'noe opredelenie gidrodinamicheskikh i kinematicheskikh kharakteristik prodol'noi kachki trimarana [Experimental determination of hydrodynamic and kinematic characteristics of longitudinal pitching of a trimaran]. Visn. Odes. nats. mor. un-tu, 2007, № 23, 81–88 s.
9. Mikhailov, V.I., Fedosov K.M. Planirovanie eksperimentov v sudostroenii [Planning experiments in shipbuilding]. L.: Sudostroenie, 1978, 160 s.
10. Ronnov, E. P., Korepanov A. E. Voprosy` prognozirovaniya soprotivleniya dvizheniyu sudov-trimarantov [Issues of predicting the movement of trimaran vessels]. Trudy 22-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2020», N.Novgorod: VGUVT, 2020, Vip. 9, 1–4 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Эдуардович Корепанов, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, Россия, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

Alexey E. Korepanov, graduate student, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, Russian Federation, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 26.11.2021

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.542

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.029>

Тенденции и перспективы развития ручных шлифовальных пневматических машин

Ю.П. Кузнецов¹, e-mail: inturbo@yandex.ru, В.Л. Химич¹, e-mail: tseu@nntu.ru,
С.Н. Хрунков¹, e-mail: khrunkov@nntu.ru, А.Б. Чуваков¹, e-mail: tchouvakov@mail.ru,
Р.А. Погодин¹, e-mail: rpogodin@yandex.ru

¹Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Аннотация. В работе представлен анализ результатов эволюции параметров ручных пневматических шлифовальных машин на протяжении значительного интервала времени. Показаны достижения ведущих мировых производителей и выбраны три основных параметра, характеризующие возможности шлифовальных машин. Выявлены тенденции изменения удельной мощности и удельного расхода машин. Проведен сравнительный анализ перспектив развития машин с роторным и турбинным приводом. Рассмотрена проблема совместной работы режущего инструмента и шлифовальной машины. Выявлена недостаточная быстроходность ручных пневматических шлифовальных машин с роторным типом привода. Сделан вывод о большей перспективности применения многоступенчатых турбин в качестве привода шлифовальных машин. Представлен анализ компоновочных схем машин с турбинным приводом мировых производителей. Обоснована новая высокоэффективная конструктивная схема радиальных многоступенчатых турбин для привода пневматических шлифовальных машин. Показаны преимущества предложенной схемы, определены пути преодоления технологических барьеров при ее реализации.

Ключевые слова: Многоступенчатая турбина, пневматическая шлифовальная машина, роторный двигатель, реактивная турбина, удельная мощность, удельный расход, коэффициент полезного действия.

Trends and development prospects of manual pneumatic grinding machines

Yuriy P. Kuznetsov¹ e-mail: inturbo@yandex.ru, Vladimir L. Khimich¹, e-mail: tseu@nntu.ru,
Sergey N. Khrunkov¹, e-mail: khrunkov@nntu.ru, Aleksandr B. Chuvakov¹, e-mail: tchouvakov@mail.ru,
Roman A. Pogodin¹, e-mail: rpogodin@yandex.ru

¹R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The paper suggests the results of analysis the parameters evolution of manual pneumatic grinding machines for a long time. The achievements of the world's leading manufacturers are shown and three main parameters that define the performance of grinding machines are selected. Trends in the specific power and specific air consumption of the machines are opened. An analysis of the development prospects for rotary and turbine machines is carried out. The problem of common action of a cutting tool and a grinding machine is considered. The insufficient speed of rotary manual pneumatic grinding machines is shown. It is determined that multi-stage turbines are most preferable for grinding machines. The design analysis of turbine machines of world manufacturers is presented. A new high-efficiency design of radial multi-stage turbines for driving pneumatic grinding machines is founded. The advantages of the new design are shown. The ways of overcoming technological challenges in the new design implementation are determined.
Key words: Multi-stage turbine, pneumatic grinding machine, rotary motor, jet turbine, specific power, specific flow, efficiency.

Введение

Ручные шлифовальные пневматические машины широко применяются во многих отраслях промышленности для выполнения различных работ подготовительного цикла: зачистки сварных швов, удалении сварочного грата и литейного облоя, при доводке прессформ и штампов и так далее.

Первые машины появились еще в конце XIX века и длительное время их параметры оставались практически неизменными. Однако в течение последних нескольких десятков лет произошло стремительное развитие большинства отраслей техники, что отразилось и на такой традиционной, даже консервативной отрасли, как производство ручного пневматического инструмента.

Современные шлифовальные машины намного легче, мощнее и экономичнее своих предшественниц.

В настоящее время мировыми лидерами в производстве шлифовальных пневматических машин являются крупные корпорации, такие как Atlas Copco, Ingersoll Rand, Daewoo, а также специализированные фирмы – Air Turbine Tools, Deprag, Biax, ATA-group и многие другие.

1. Параметры оценки эволюции машин

Выявить тенденции развития шлифовальных машин можно, отследив их эволюцию на протяжении значительного интервала времени.

С этой целью сопоставим параметры современных машин с требованиями ГОСТ 12634-80 «Машины ручные шлифовальные пневматические. Технические условия» [1], в котором фактически зафиксированы характеристики машин, достигнутые в отрасли к 1980 году. Для сравнения машин будем использовать следующие три наиболее характерных параметра:

- удельная мощность $\frac{N_e}{m}$ кВт/кг, где N_e – эффективная мощность привода, кВт; m – масса машины, кг;
- удельный расход воздуха $q = \frac{Q}{N_e}$ м³/мин·кВт, где Q – объемный расход воздуха при нормальных условиях, м³/мин;
- эффективный коэффициент полезного действия привода $\eta_e = \frac{0,42}{q}$ где 0,42 м³/(мин·кВт) – размерный коэффициент.

Внесем параметры рассматриваемых машин в таблицу 1, расположив их в порядке возрастания номинальной мощности. Представленные данные получены в открытых официальных источниках фирм-производителей [2, 3, 4, 5]. Дополнительно вычислим среднеарифметические значения указанных параметров для каждого модельного ряда, а также для совокупности представленных машин.

Таблица 1.

№	Индекс модели машины	Удельная мощность, кВт/кг $\frac{N_e}{m}$	Удельный расход, м ³ /(мин·кВт) $q = \frac{Q}{N_e}$	Эффективный КПД η_e
1	2	3	4	5
ГОСТ 12634-80				
В качестве индекса машины - мощность N_e , кВт				
1	0,03	0,10	3,00	0,14
2	0,16	0,20	1,55	0,27
3	0,25	0,25	1,90	0,22
4	0,35	0,25	2,00	0,21
5	0,50	0,26	2,04	0,21
6	0,70	0,27	1,75	0,24
7	0,85	0,24	1,55	0,27
8	1,3	0,27	1,40	0,30
9	1,5	0,28	1,35	0,31
10	1,7	0,24	1,30	0,31
В среднем		0,24	1,78	0,24
Air Turbine Tools, машины с турбинным приводом				
1	201SV	0,88	1,32	0,32
2	204XSV	1,30	1,17	0,36
3	525SV	0,85	1,63	0,26
4	202DM	1,11	1,36	0,31
5	525XDM	1,17	1,25	0,34
В среднем		1,06	1,35	0,32
Viax, машины с ротационным приводом				
1	TSD 385	0,53	1,7	0,25
2	SARD 830	0,52	1,5	0,27
3	SRD 8-20/2	0,53	1,7	0,25
4	SRH 10-15/2	0,41	1,7	0,24
В среднем		0,50	1,65	0,25
ATA-group, машины с ротационным приводом				
1	SP75R	0,73	1,8	0,23
2	SD45R	0,63	1,5	0,27
3	S50	0,53	2,4	0,18
4	SD37L	0,65	1,4	0,31
5	S22L	0,68	1,4	0,31
6	SV27LR	0,88	1,2	0,34
В среднем		0,68	1,61	0,26
Atlas Copco, машины с ротационным приводом				
1	LSF19 S300-1	1,00	1,4	0,31
2	LSF28 S250	1,08	1,3	0,33

3	LSF38 S250E-01	0,90	1,2	0,34
4	LSR48 S090-CW	0,65	1,1	0,37
5	LSR48 S060-15	0,43	1,1	0,39
6	LSR64 S100-15	0,50	1,1	0,38
В среднем		0,76	1,20	0,35
Обобщенное среднее		0,76	1,44	0,29

Оценим величину изменения параметров модельных рядов машин, представленных в таблице 1, по отношению к требованиям ГОСТа [1]:

- Фирма Air Turbine Tools, шлифовальные машины с турбинным приводом. Тип турбины – центробежная реактивная турбина. Удельная мощность машин увеличилась в среднем в 4,4 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 24%.
- Фирма Viax, шлифовальные машины с ротационным приводом. Удельная мощность увеличилась в среднем в 2,1 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 7%.
- Фирма ATA-group, шлифовальные машины с ротационным приводом. Удельная мощность увеличилась в среднем в 2,8 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 9,5%.
- Фирма Atlas Copco, шлифовальные машины с ротационным приводом. Удельная мощность увеличилась в среднем в 3,2 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 32%.

Полученные результаты выявили два наиболее значимых направления в эволюции параметров пневматических машин – повышение удельной мощности и снижение удельного расхода воздуха.

Удельный расход воздуха за рассматриваемый интервал времени снизился в среднем на 20%, а удельная мощность выросла в среднем в 3 раза, что обусловлено периодическим появлением на рынке шлифовальных кругов с увеличенной скоростью резания.

2. Параметры режущего инструмента

В ручных пневматических шлифовальных машинах применяются различные типы приводов: ротационно-пластинчатый, турбинный, аксиально-поршневой, шестеренный и так далее.

Характеристики ротационно-пластинчатых двигателей хорошо коррелируются с параметрами шлифовальных кругов на керамической связке, скорость резания которых (25...40 м/с) остается неизменной в течение уже многих десятилетий. В результате машины с ротационным приводом заняли доминирующее положение в отрасли, составляя более 99% от всего парка машин.

В настоящее время абразивная промышленность освоила серийное производство шлифовальных кругов со скоростями резания 65...120 м/с [5, 6], применение которых способно существенно повысить производительность процесса шлифования. Для высокоскоростных шлифовальных кругов потребовались машины с повышенной частотой вращения и, одновременно, с увеличенной мощностью привода. Производители отреагировали на эту тенденцию созданием более высокооборотных шлифмашин, но сохранили в качестве привода ротационно-пластинчатый двигатель.

Так, в каталогах фирмы Atlas Copco появились ротационные машины LSF12 S400-1 с частотой вращения 40 000 мин⁻¹ при мощности 0,36 кВт и LS F19 S460E-1/R с частотой вращения 46 000 мин⁻¹ при мощности 0,51 кВт [7].

Для эффективной работы высокоскоростных шлифовальных кругов при частоте вращения машины 40 000...45 000 мин⁻¹ требуется повысить мощность до 0,7...1,1 кВт. В настоящее время ни одна фирма в мире не имеет ротационных машин с таким сочетанием параметров.

Следует отметить, что одновременное увеличение частоты вращения и мощности для ротационно-пластинчатого двигателя в принципе весьма проблематично, поскольку для повышения мощности требуется увеличение диаметра ротора, а для повышения частоты вращения, наоборот, его уменьшение.

В то же время достижение таких параметров в машинах с турбинным приводом не вызывает серьезных затруднений. Так, машина 210SV (фирма Air Turbine Tools) при 40 000 мин⁻¹ имеет мощность 0,66 кВт [2], а машина 230XDM при 40 000 мин⁻¹ – мощность 1,04 кВт [2].

Таким образом, можно констатировать, что ротационные машины не используют в полной мере преимущества высокоскоростных шлифовальных кругов, что, естественно, в свою очередь, сдерживает их производство и широкое применение.

3. Перспективы развития шлифовальных пневматических машин

Признанным мировым лидером в производстве пневматического инструмента является шведская фирма Atlas Copco. Анализ данных из каталогов пневматического инструмента Atlas Copco за 2001, 2011 и 2020 годы показал, что параметры машин с ротационным приводом в течение последних 20 лет практически не изменились. Это дает основания считать, что машины с ротационно-пластинчатым приводом приблизились к пика своего развития и дальнейшие вложения в их совершенствование в настоящее время не актуальны.

Машины с турбинным приводом имеют более благоприятные перспективы развития, поскольку одновременное повышение мощности и частоты вращения для них не представляет особых трудностей: для повышения мощности турбины достаточно увеличить площадь сопел, а увеличение частоты вращения ротора ограничено только быстроходностью подшипников. Одновременно с этим, применение турбинного привода способно уменьшить вес и габариты машин и снизить уровень вибрации.

Указанные преимущества турбинного привода делают его наиболее перспективным для применения в ручных шлифовальных пневматических машинах. В настоящее время серийный выпуск машин с турбинным приводом освоен фирмами Air Turbine Tools (США) и Deprag (Германия-Чехия), однако их доля в парке ручных шлифовальных пневматических машин не превышает одного процента. Проведенный анализ показал, что несмотря на использование этими фирмами различных типов турбоприводов (фирма Air Turbine Tools использует центробежную реактивную турбину, а фирма Deprag – осевую

турбину с двумя ступенями скорости), в обоих случаях основным барьером на пути продвижения машин является именно тип турбины. Ниже рассмотрим конкретные причины, препятствующие широкому распространению этих машин с турбинным приводом.

Единственная фирма, специализирующаяся на выпуске шлифовальных пневматических машин исключительно с турбинным приводом – это фирма Air Turbine Tools. В качестве привода применяется центробежная реактивная турбина типа «сегнерово колесо» [8], которая имеет самую пологую характеристику крутящего момента среди всех известных типов турбин. В результате увеличение нагрузки на ротор приводит к остановкам машины, несмотря на наличие регулятора частоты вращения. Это затрудняет работу оператора, особенно на операциях черного (грубого) шлифования, когда требуется снимать большой объем металла. При этом фирма поддерживает достаточно высокий уровень продаж, обусловленный низкой стоимостью машин, достигаемой, в первую очередь, за счет изготовления основных элементов турбинного привода из пластмассы литьем в прессформах.

В шлифовальных машинах фирмы Deprag используется осевая турбина с двумя ступенями скорости (рисунок 1), изготовление лопаточных венцов которой выполняется методом пятикоординатного фрезерования в диске рабочего колеса. Для достижения высокого КПД в осевой турбинной ступени необходимо обеспечивать предельно малые радиальные зазоры между лопаточными венцами и прилегающими к ним цилиндрическими поверхностями. Указанные факторы обуславливают высокую стоимость машин (порядка 1000\$), что препятствует ее широкому распространению.

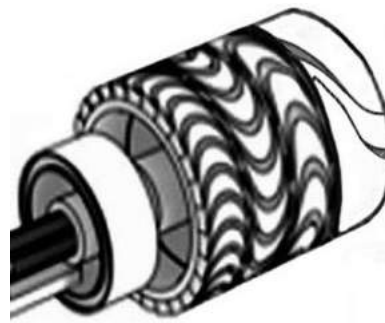


Рис. 1. Осевая турбина машины фирмы Deprag

4. Обоснование выбора эффективной конструктивной схемы турбинного привода

Проанализируем возможность создания турбинного привода для ручных пневматических шлифовальных машин, свободного от рассмотренных выше недостатков.

Решением этой проблемы может быть применение многоступенчатых турбин с осевым расположением радиальных ступеней. Многоступенчатые турбины со ступенями давления, в принципе, могут быть сконструированы как из одноступенчатых турбин, так и из турбин с двумя ступенями скорости. При равной частоте вращения ротора во втором варианте общее число всех лопаточных венцов будет в два раза меньше.

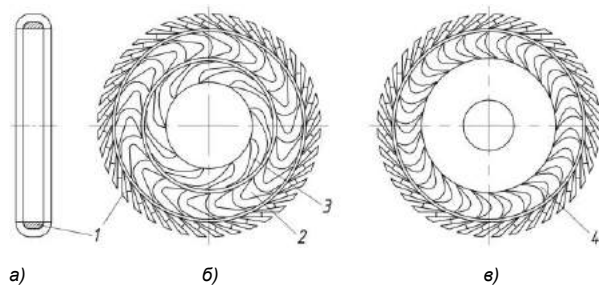
Поэтому, оптимальной для достижения заданной частоты вращения является многоступенчатая турбина, в которой ступени давления представляют собой турбины с двумя ступенями скорости.

Основными задачами создания такой турбины являются:

- разработка эффективной и технологичной базовой ступени;
- разработка эффективных уплотнений между ступенями.

Реализовать поставленные задачи возможно путем использования в качестве базовой ступени турбины по патенту на полезную модель [9].

Основной отличительной особенностью турбины является установка центробежного 2 и центростремительного 4 рабочих лопаточных венцов на двух сторонах единого диска рабочего колеса (рисунок 2). Внутри кольцевой решетки рабочего колеса 2 установлен сопловой аппарат 3. Промежуточный направляющий аппарат 1 размещен концентрично рабочему колесу с охватом его по периферии.



1 – промежуточный направляющий аппарат;
2, 4 – рабочие лопаточные венцы;
3 – сопловой аппарат

а – ПНА (продольное сечение);
б – вид со стороны неподвижного соплового аппарата;
в – вид со стороны венца центростремительных рабочих лопаток;

Рис. 2. Базовая ступень турбины

Преимущества базовой ступени, фотография которой представлена на рисунке 3, обусловлены следующими конструктивными особенностями:

- применение турбинных ступеней радиального типа позволяет изготавливать их высокотехнологичными методами литья под давлением в прессформе;
- имеется конструктивная возможность крепления к рабочим лопаткам бандажного кольца, дополнительно снижающего утечки потока из лопаток;
- течение газа через рабочие лопатки происходит в одной плоскости, что определяет низкие потери течения;
- рабочее колесо располагается концентрично внутри кольца промежуточного направляющего

аппарата, что обеспечивает простую и высокотехнологичную процедуру сборки.

Задача создания высокоэффективного уплотнения между ступенями может быть решена на базе применения конструктивной схемы по патенту на полезную модель [10], предусматривающей центрирование заостренных гребней уплотнения непосредственно по валу.



Рис. 3. Фотография базовой ступени турбинного привода

В разработанной конструкции (рисунок 4) диафрагма 1, содержащая каналы для прохода воздуха 2 между ступенями, прижата к уступу корпуса шлифовальной машины. К диафрагме крепится диск 3 с заостренным гребнем, сопряженным с поверхностью вала 4. Конструкция позволяет добиться минимально возможного по условиям машиностроительного производства зазора между гребнем и валом, величина которого не превышает нескольких сотых долей миллиметра.

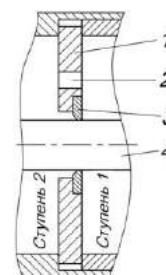


Рис. 4. Уплотнения диафрагмы

Применение многоступенчатых турбин значительно расширяет перспективы использования шлифовальных машин за счет возможности создания модельной линии машин с диапазоном изменения частоты вращения 20 000...90 000 мин⁻¹ и мощности 0,2...2,0 кВт, удовлетворяющей большинству потребностей обрабатывающей промышленности.

Заключение

Таким образом, в данной работе описан достигнутый к настоящему времени уровень развития ручных пневматических шлифовальных машин. Показано, что для дальнейшего развития и использования современного режущего инструмента необходимо применение турбинного привода. Обосновано применение турбинных ступеней радиального типа.

Литература

- ГОСТ 12634-80. Машины ручные шлифовальные пневматические. Технические условия. Введ. 1981-01-01 М., 1985, 6с.
- Шлифмашины Air Turbine [Электронный ресурс] // ООО «Ветки»: официальный дилер в России. URL: http://www.vetki.ru/assets/files/PDFs/Vendors/AirTurbine_HandToolsSeries_RUS.pdf (дата обращения: 09.04.2021).
- BIAX Professional Power. Шлифовальные машины, напильники, машинки для удаления грата [Электронный ресурс] // ST-Group: официальный дилер в России. URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/biax/Catalog_01.pdf (дата обращения: 09.04.2021).
- Ata tools. Пневматический инструмент [Электронный ресурс] // ООО «ИНСТЕК»: дистрибьютер инструмента в России. URL: <https://instek.su/f/katalog-pnevmoinstrumenta-ata-2011.pdf> (дата обращения 09.04.2021).
- PFERD. Шлифовальные головки [Электронный ресурс] // PFERD: Производитель инструмента. URL: <https://www.pferd.com/media/PDF-ru/tool-manual-ru/PFERD-tool-manual-catalogue-3-ru.pdf> (дата обращения 09.04.2021).
- ГОСТ Р 53410-2009. Круги зачистные для ручных шлифовальных машин. Технические условия. Введ. 2011-01-01 М., 2009, 12с.
- Atlas Copco. Промышленный инструмент для производства, технического обслуживания и ремонта [Электронный ресурс] // Atlas Copco: Производитель инструмента. URL: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/russia/documents/9833-2001-01-f-m-bolting-2020-rus-web.pdf> (дата обращения: 09.04.2021).
- Кузнецов Ю.П., Химич В.Л., Хрунков С.Н., Чуваков А.Б., Погодин Р.А. Исследование характеристик радиальной реактивной турбины // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 4. С.146-154.
- Многоступенчатая радиальная турбина: пат. 110132 Рос. Федерация: МПК F01D 1/06 F01D 9/02 / Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б.; заявитель и патентообладатель Кузнецов Юрий Павлович, Чуваков Александр Борисович. - № 2011119164/06, заявл. 12.05.2011; опубл. 10.11.2011, бюл. № 31. – 8 с.
- Турбомашина: пат. 193118 Рос. Федерация: МПК F01D 1/06 F01D 9/02 / Кузнецов Ю.П., Чуваков, А.Б., Погодин Р.А.; заявитель и патентообладатель Кузнецов Юрий Павлович, Чуваков Александр Борисович. - № 2011119164/06, заявл. 12.05.2011; опубл. 15.10.2019, бюл. № 29. – 8 с.

References

- GOST 12634-80. Mashiny ruchnye shlifoval'nye pnevmaticheskie. Tehnicheskie uslovija [Pneumatic manual grinding machines. Technical conditions]. Vved. 1981-01-01 M., 1985, 6s.
- Shlifmashinki Air Turbine [Air Turbine Grinding Machine] [Jelektronnyj resurs] // ООО «Vetki»: oficial'nyj diler v Rossii. URL: http://www.vetki.ru/assets/files/PDFs/Vendors/AirTurbine_HandToolsSeries_RUS.pdf (data obrashhenija: 09.04.2021).
- BIAX Professional Power. Shlifoval'nye mashiny, napil'niki, mashinki dlja udalenija grata [BIMAX Professional Power. Grinding machines, files, deburring machines] [Jelektronnyj resurs] // ST-Group: oficial'nyj diler v Rossii. URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/biax/Catalog_01.pdf (data obrashhenija: 09.04.2021).
- Ata tools. Pnevmaticheskij instrument [Ata tools. Pneumatic tool] [Jelektronnyj resurs] // ООО «INSTEK»: distrib'juter instrumenta v Rossii. URL: <https://instek.su/f/katalog-pnevmoinstrumenta-ata-2011.pdf> (data obrashhenija 09.04.2021).
- PFERD. Shlifoval'nye golovki [PFERD. Grinding heads] [Jelektronnyj resurs] // PFERD: Proizvoditel' instrumenta. URL: <https://www.pferd.com/media/PDF-ru/tool-manual-ru/PFERD-tool-manual-catalogue-3-ru.pdf> (data obrashhenija 09.04.2021).
- GOST R 53410-2009. Krugi zachistnye dlja ruchnyh shlifoval'nyh mashin. Tehnicheskie uslovija. [Grinding wheels for hand grinders. Technical conditions] Vved. 2011-01-01 M., 2009, 12c.
- Atlas Copco. Promyshlennyj instrument dlja proizvodstva, tehničeskogo obsluzhivanija i remonta [Atlas Copco. Industrial tools for production, maintenance and repair] [Jelektronnyj resurs] // Atlas Copco: Proizvoditel' instrumenta. URL: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/russia/documents/9833-2001-01-f-m-bolting-2020-rus-web.pdf> (data obrashhenija: 09.04.2021).
- Kuznecov Ju.P., Khimich V.L., Khrunkov S.N., Tchuvakov A.B., Pogodin R.A. Issledovanie harakteristik radial'noj reaktivnoj turbiny // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij [Investigation of the characteristics of a radial jet turbine] . Aviacionnaja tehnika. 2020. № 4. S.146-154.
- Mnogovenechnaja radial'naja turbine [Multi-stage radial turbine] : pat. 110132 Ros. Federacija: MPK F01D 1/06 F01D 9/02 / Kuznecov Ju.P., Tchuvakov A.B.; zajavitel' i patentoobladatel' Kuznecov Jurij Pavlovich, Tchuvakov Aleksandr Borisovich. - № 2011119164/06, zajavl. 12.05.2011; opubl. 10.11.2011, bjul. № 31. – 8 s.
- Turbomashina [Turbomachine] : pat. 193118 Ros. Federacija: MPK F01D 1/06 F01D 9/02 / Kuznecov Ju.P., Tchuvakov, A.B., Pogodin R.A.; zajavitel' i patentoobladatel' Kuznecov Jurij Pavlovich, Tchuvakov Aleksandr Borisovich. - № 2011119164/06, zajavl. 12.05.2011; opubl. 15.10.2019, bjul. № 29. – 8 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Павлович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: inturbo@yandex.ru

Владимир Леонидович Химич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: vlkhimich@mail.ru

Сергей Николаевич Хрунков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Александр Борисович Чуваков кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: tchouvakov@mail.ru

Роман Александрович Погодин, аспирант кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, 24, e-mail: rpogodin@yandex.ru

Yuriy P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: inturbo@yandex.ru

Vladimir L. Khimich, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: vlkhimich@mail.ru

Sergey N. Khrunkov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, Head of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: khrunkov@nntu.ru

Aleksandr B. Chuvakov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, assistant professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: tchouvakov@mail.ru

Roman A. Pogodin, graduate student of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: rpogodin@yandex.ru

Поступила в редакцию: 02.06.2021

Принята к публикации: 08.11.2021

Анализ причин образования подбуртовых трещин втулки среднеоборотных двигателей внутреннего сгорания

И.Н. Рубан¹, e-mail: irinaruban1979@mail.ru, В.П. Булгаков¹, e-mail: mbulgak@mail.ru,
О.В. Федорова¹, e-mail: ov_fedorova2005@mail.ru

¹Астраханский государственный технический университет

Аннотация. Вибрация цилиндрической втулки, вызванная перекалкой поршня, развивает колебания вдоль по длине втулки от бурта до основания и акустические колебания внутри втулки, которые приводят к возникновению растягивающих напряжений и деформаций в поверхностных слоях металла; при взаимодействии с водой создаются условия для диффузии водорода во втулку. Диффузия водорода повышает внутреннее давление, что вызывает растрескивание структуры металла под действием напряжений. Происходит деградация металла – снижение прочностных и пластических свойств. Причиной появления подбуртовых трещин и кавитационные разрушения цилиндрической втулки является усталость деградированного металла от «водородного растрескивания под напряжением» и действия циклических растягивающих напряжений. Для повышения долговечности втулок по подбуртовым трещинам необходимо: 1. Увеличение износостойкости скользящей поверхности втулки для стабилизации величины теплового зазора; 2. Повышение жесткости втулки за счет увеличения толщины втулки в подбуртовой зоне; 3. Применение металла втулки с малой чувствительностью к «водородному растрескиванию под напряжением» (замена чугуна с пластинчатой формой графита на сферическую).

Ключевые слова: вибрация, втулка, подбуртовые трещины, кавитация, колебания, акустические волны, охлаждающая жидкость, тепловой зазор, жесткость втулки, интерференция, растягивающие напряжения, водородное растрескивание под напряжением.

Analysis of the reasons for the formation of under-collar cracks in the bushing of medium-speed combustion engines

Irina N. Ruban¹, e-mail: irinaruban1979@mail.ru, Vladimir P. Bulgakov¹, e-mail: mbulgak@mail.ru,
Olesya V. Fyodorova¹, e-mail: ov_fedorova2005@mail.ru

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The vibration of the cylinder bushing caused by the piston displacement develops the vibrations along the length of the bushing from the collar to the base and acoustic vibrations inside the collar, which lead to tensile stresses and deformation in the surface layers of the metal; when interacting with water, conditions for the diffusion of hydrogen into the bushing are created. The diffusion of hydrogen increases internal pressure, which causes the cracking of the metal structure under stress. The degradation of the metal that is the decrease in strength and plastic properties occurs. The reason for the formation of under – collar cracks and cavitation destruction of the cylinder bushing is the fatigue of the degraded metal from "hydrogen stress cracking" and the action of cyclic tensile stresses. To increase the durability of the bushings along the under – collar cracks, it is necessary to: 1. Increase the wear resistance of the sliding surface of the bushing to stabilize the value of the thermal gap; 2. Increase the stiffening effect of the bushing by increasing the thickness of the bushing in the under – collar zone; 3. Apply the metal of the bushings with low sensitivity to "hydrogen stress cracking" (replace the cast iron with lamellar graphite for the spherical one).

Key words: vibration, bushing, under – collar cracks, cavitation, vibrations, acoustic waves, coolant, thermal gap, bushing stiffness, interference, tensile stresses, hydrogen stress cracking.

Введение

Преждевременная замена втулок двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в процессе эксплуатации связана с кавитационно-эрозийным разрушением наружных поверхностей охлаждаемой жидкостью и трещинами под буртами, которые уменьшают общий ресурс по износу зеркала в 3-4 раза. Количество отказов дизелей по вине подбуртовых трещин и по вине кавитационно-эрозийного износа втулок имеют относительно равные процентные соотношения [1]. Подбуртовые трещины начинаются с поверхности в местах перехода от опорной плоскости к цилиндру на галтелях с малым радиусом закругления и грубой поверхностью. Очаги кавитационных повреждений под посадочными буртами всегда оказывались концентраторами зарождения трещин, и в условиях циклических, механических и тепловых нагрузок быстро развиваются и приводят к обрыву буртов [2].

Для выбора методов повышения надежности втулок ДВС необходимо исследовать природу, условия и причины повреждения охлаждаемых водой поверхностей втулок (кавитации) и возникновение трещин под посадочными буртами [3].

Основная часть

Основной причиной разрушений деталей ЦПГ является вибрация цилиндрической втулки, перемещение нижней части втулки при повышенных зазорах в нижнем поясе, малый температурный зазор в верхнем посадочном поясе, нарушение теплового режима, задиры и заедание поршня в цилиндре, вибрация блоков [4]. Наиболее интенсивную вибрацию втулки вызывают удары поршней о стенку при перекалывании. Амплитуда ускорений при ударе поршня в 2-3 раза больше ускорений, возникающих вследствие воздействия газовых сил под действием сгорания топлива. Полагая, что кинетическая энергия (Т) ударяющего поршня полностью переходит в потенциальную

энергию деформации упругой системы втулки U_d : $T=U_d$. Так как к моменту окончания деформации поршень пройдет путь $H+\delta_d$, то запас его энергии будет измеряться работой A_d и равен: $T=A_d=Q \cdot (H+\delta_d)$, где H – тепловой зазор между поршнем и втулкой; δ_d – продольная деформация втулки; Q – сосредоточенный вес поршня. При динамическом воздействии нагрузки закон Гука остается в силе и модули упругости сохраняют свою величину. При ударе деформация происходит быстро, но не мгновенно, δ_d постепенно растет от 0 до окончательного значения; параллельно росту деформаций возрастают и напряжения σ_d , при этом: $U_d = \frac{1}{2} P_d \cdot \delta_d = \frac{C}{2} \cdot \delta_d^2 = \frac{Q}{2\delta_c} \delta_d^2$;

$$Q(H + \delta_d) = \frac{Q}{2\delta_c} \delta_d^2, \quad (1)$$

находим динамическую деформацию удара: $\delta_d^2 - 2\delta_d\delta_c - 2H\delta_c = 0$,

$$\delta_d = \delta_c \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_c}} \right) = K_d \delta_c, \quad (2)$$

динамический коэффициент K_d будет равен:

$$K_d = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_c}} \right), \quad (3)$$

Если при $\frac{2H}{\delta_c} \geq 10$, то $K_d = \sqrt{\frac{2H}{\delta_c}}$, (4)

напряжения $\sigma_d = K_d \sigma_c$; усилия $P_d = K_d P_c$; деформации $\delta_d = K_d \delta_c$.

Величина импульса от удара поршня по втулке при перекадке представляет собой вибрационную импульсную нагрузку, меняющуюся по гармоническому закону с частотой θ :

$$S = \lim(P_d \cdot \tau) \sin \theta t, \quad \tau \rightarrow 0, \quad (5)$$

Запас энергии поршня:

$$T = A_d = Q(H + \delta_d) = Q \left[H + \delta_c \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_c}} \right) \right], \quad (6)$$

Энергия поршня при перекадке зависит от величины теплового зазора. С увеличением зазора энергия удара возрастает.

Исследовательская часть

Установлено, что наиболее интенсивные разрушения от кавитации наблюдаются на тех втулках и цилиндрах блока, у которых зазор между поршнем и втулкой наибольший [4].

От удара поршня по внутренней поверхности втулки развивается два вида колебаний:

1). Колебания по длине втулки от бурта до основании вызывают изгибающие напряжения и растягивающие деформации в поверхностных водоохлаждаемых слоях металла;

2). Акустические колебания в металле, которые вызывают пульсирующие напряжения в поперечном сечении от внутренней до охлаждаемой поверхности втулки.

Колебание цилиндрической втулки рассчитывались по линейной модели колебаний цилиндрической балки возбуждаемой мгновенно приложенной силой, которая является периодически пульсирующей ударной силой бокового давления от перекадки поршня вблизи верхней мертвой точки (ВМТ) (см. рис.1). Уравнение движения вынужденных незатухающих колебаний упругой системы с одной степенью свободы:

$$\frac{u}{dt^2} + w^2 u = \frac{P}{m} \sin \theta t, \quad (7)$$

Внешняя сила – вибрационная периодическая нагрузка (удары поршня) происходит по гармоническому закону с частотой θ . Интеграл однородного уравнения известен [5], найдем решение в виде:

$$u = C \sin \theta t. \quad (8)$$

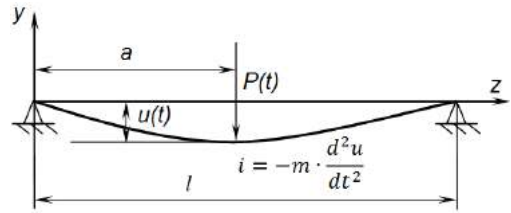


Рис.1. Расчетная схема определения вынужденных колебаний цилиндрической втулки под действием боковой силы от перекадки поршня

Подставляя выражение (8) в уравнение (7) определим: $C = \frac{P}{m(w^2 - \theta^2)} = \frac{P}{mw^2(1 - \frac{\theta^2}{w^2})}$, если учесть

$$w^2 = \frac{1}{m\delta_{11}}, \quad P\delta = u_{ст}, \quad \text{получим:}$$

$$C = \frac{P\delta_{11}}{1 - \frac{\theta^2}{w^2}} = \frac{u_{ст}}{1 - \frac{\theta^2}{w^2}}. \quad (9)$$

Решение уравнения имеет вид:

$$u = A \sin(\omega t + \nu) + \frac{u_{ст}}{1 - \frac{\theta^2}{w^2}} \sin \theta t. \quad (10)$$

Первое слагаемое представляет собственные колебания, второе – описывает вынужденные колебания втулки. Так как собственные колебания в реальных условиях быстро затухают, то рассмотрим только вынужденные колебания с частотой θ ударов поршня при перекадке; наибольшую амплитуду вынужденных колебаний определим при $\sin \theta t = 1$:

$$u_{max} = \frac{u_{ст}}{1 - \frac{\theta^2}{w^2}} = u_{ст} \mu, \quad (11)$$

в которой μ – коэффициент динамичности:

$$\mu = \frac{1}{1 - \frac{\theta^2}{w^2}}. \quad (12)$$

Определим напряжения под посадочным буртом:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (13)$$

При вертикальном расположении втулок внутренний изгибающий момент равен:

$$M = P_c K_d \mu a, \quad (14)$$

где: P_c – величина статического усилия поршня, K_d – динамический коэффициент усиления удара поршня по втулке, μ – динамический коэффициент усиления колебаний, a – плечо момента сил при перекадке.

Момент сопротивления цилиндра втулки: $W = \frac{\pi d^3}{32} (1 - c_0^4)$, $c_0 = \frac{d_0}{d}$, где: d_0 – наружный диаметр, d – внутренний диаметр втулки.

Условия долговечности втулки по подбуртовым трещинам:

$$\sigma = \frac{P_c K_d \mu a}{\frac{\pi d^3}{32} (1 - c_0^4)} < \sigma_{-1}. \quad (15)$$

Факторы, снижающие напряжения в подбуртовой зоне: а) стабилизация величины теплового зазора (поршень-втулка) за счет повышения износостойкости скользящей поверхности втулки (зеркала металла); б) повышение жесткости втулки за счет увеличения толщины металла в подбуртовой зоне [2].

Деформации и напряжения, вызванные ударом при перекадке, распространяются во втулке в форме волны со скоростью звука. Импульс, как волна,

состоит из двух составляющих: упругие возмущения в металле распространяются в виде волн двух видов. В возмущениях первого вида волн движение частиц (деформация) происходит в направлении движения волны. Это продольная волна – волна расширения или безвихревая волна. Второе возмущение называется поперечной – сдвиговой волной или волной искажения. Поперечная волна распространяется в металле с помощью сдвиговых перемещений (деформаций).

Частицы продольных волн (L – волны) колеблются вдоль направления распространения волны. Направление колебаний частиц поперечных волн (T – волны) перпендикулярно направлению распространения волны. Поперечные волны распространяются только в твердых телах. При продольной волне имеются напряжения, как в направлении распространения волны, так и в перпендикулярном направлении. Напряжение σ_1 , нормальное фронту волны и напряжение перпендикулярное первому, связаны соотношением: $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1-\nu}{\nu}$, (16)

где ν – коэффициент Пуассона.

Эффекты интерференции происходят внутри тела втулки. Одиночные возмущения при встрече со свободной поверхностью отражаются и приводят к интерференции падающего и отраженного возмущения. Пока деформации в теле остаются упругими для определения величины напряжения и скорости деформации частиц в точках интерференции используем принцип суперпозиции. Это значит, что напряжения и скорости частиц в отдельных волнах можно векторно складывать для получения результирующих значений. Отражения от свободной поверхности, если падающая волна является сжимающей, то отраженная волна расширения той же интенсивности, и наоборот, падающая поперечная волна возбуждает в металле только поперечную волну. В момент встречи двух волн (падающей и отраженной) напряжения удваиваются (см. рис. 2).

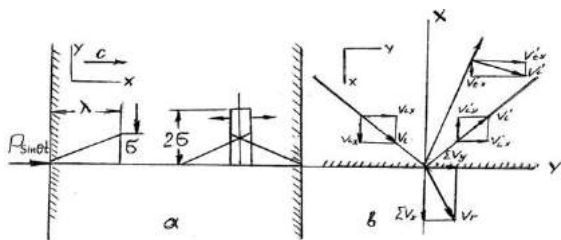


Рис.2. Интерференция акустических волн в металле втулки: c – скорость движения импульса, λ – длина волны импульса, σ – максимальное напряжение импульса, V_i – скорость падающей волны, V_r – скорость поперечной волны, V_r – скорость проходящей, продольной волны

Условия на границе раздела втулки металла и охлаждающей воды следующие: а) непрерывность напряжения; б) непрерывность скорости частиц. Фазы и величина отраженного напряжения определяются относительными значениями удельного акустического сопротивления двух материалов (чугуна и воды). При разделении интенсивности падающей волны на интенсивность отраженной продольных и перечных волн и

проходящей волны должно соблюдаться требование условий равновесия: напряжения всех волн обращается в ноль на свободной поверхности:

$$\sum(\sigma_x + \tau_x) = 0, \quad (17)$$

В падающей и отраженной волнах имеются одинаковые знаки и интерференция образует в металле двухосное растяжение [6]. Импульс от перекладки поршня, как продольная волна отражается от охлаждаемой поверхности и частично проникает в воду, создавая в ней определенные возмущения. Поперечная сдвиговая волна целиком отражается от водоохлаждаемой поверхности (в воде поперечных волн не существует). Поперечные волны (падающие и отраженные) интерферируют в плоскости нормальной к скорости распространения волны. И на расстоянии размеров импульсов от поверхности создают двухосное растяжение в водоохлаждаемой поверхности втулки. Если учесть, что продольные и сдвиговые волны совместно интерферируют и происходят непрерывно, то напряженное состояние представим как трехосное растяжение, которому соответствует тензор мгновенных напряжений [7]:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} S_1 > 0 \\ S_2 > 0 \\ S_3 > 0 \end{matrix}. \quad (18)$$

Мгновенное значение нормального напряжения в падающей и отраженной волнах создают объемную схему напряженно-деформированного состояния в металле у водоохлаждаемой поверхности втулки. При всестороннем растяжении пластическая деформация невозможна. Возможно только хрупкое разрушение отрывом [8].

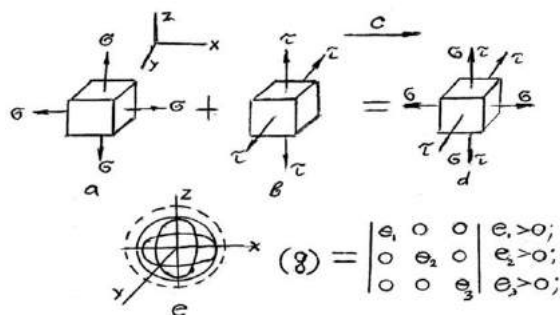


Рис. 3. Схема местного напряженно-деформированного состояния втулки в водоохлаждаемом поверхностном слое металла: а) напряжение от продольных волн; б) напряжение от сдвиговых волн; в) направление действие импульса; д) суперпозиция продольных сдвиговых напряжений; е) эпюра деформации

Удары от перекладки поршня производят в металле импульсы объемных растягивающих напряжений при соответствующей частоте. Объемные растягивающие напряжения вызывают изменения в структуре металла и, соответственно, изменение свойств. Импульс продольной волны, выходящий в охлаждаемую воду, создает возмущение, которое вызывает резонанс между упругими колебаниями втулки и волнами давления воды в системе охлаждения ДВС. Источником водорода для диффузии является вода в системе охлаждения. Вибрация втулки способствует диссоциации воды и повышению парциального давления водорода (давление $\approx 10-15$ КПа) способного диффундировать

в металл. В металле могут находиться газы азот, кислород в различных формах в количестве 0,01...0,007%. Водород растворяется в твердых растворах феррита, аустенита, находится в дефектах кристаллического строения, дефектах структуры, замкнутых объемах – порах, местах ликвации серы, неметаллических включениях. Растворимость водорода в металле определяются законом квадратного корня (Сиверса) [9]: при заданной температуре концентрация растворенного в металле водорода пропорциональна квадратному корню из парциального давления водорода над металлом:

$$[H] = K\sqrt{P_h}, \quad (19)$$

Наложение растягивающих напряжений облегчает анодный и катодный процессы в металле, электродный потенциал структуры сдвигается к более отрицательным значениям [10]. Способность водорода к адсорбции, диффузии и растворимости в металле образуют сегрегацию водорода в микродефектах, происходит направленное движение диффузионно-активного свободного водорода в атомарной или ионной форме в металл, идет его молизация, сопровождающаяся высоким давлением. Происходит «накачка» связанного водорода в дефекты структуры на границу зерен [11]. Рекомбинация свободного атомарного водорода сопровождается интенсивным пульсирующим тепловыделением и механическим взрывом (тепловым взрывом) $Q = 430$ кДж/моль. За время $10^{-3} \dots 10^{-4}$ с, что в 1,7 раза больше при полном окислении водорода ($Q = 242 \dots 286$ кДж/моль). Импульсное повышение давления и температуры в ловушках-дефектах при тепловом взрыве является причиной образования и роста микротрещин, на границах зерен и увеличения размеров имеющихся трещин [12]. Увеличение содержания водорода в металле приводит к изменению физических и механических свойств к хрупкому разрушению

деталей даже при малых нагрузках и к интенсивному изнашиванию втулки.

Механизм растрескивания объясняется развитием внутреннего давления, вызванного скоплением газообразного водорода, образующегося при молизации атомарного водорода растворенного в микроструктуре и напряжением деформированных зон структуры металла. Центры водородного растрескивания в стали и чугуне возникают на границе неметаллических включений: сульфидов, оксидов и силикатов. Генеральное направление развития трещин перпендикулярно оси растягивающих напряжений. Атомарный водород в пересыщенном твердом растворе диффундирует в макро и микро дефекты, образованные в процессе циклической деформации, рекомбинирует до молекулярного водорода, вследствие чего создается внутреннее парциальное давление водорода.

Согласно теории разрушения Гриффитса, водород проникающий в металл понижает разрушающее напряжение адсорбируясь на внутренних поверхностях структурных составляющих. Адсорбция понижает поверхностную энергию и соответственно напряжение растрескивания [13]. В результате происходит хрупкое разрушение металла при напряжении:

$$\sigma = [2EV/\pi(1 - \nu^2)a]^{0,5} < \sigma_{-1}, \quad (20)$$

где: σ – разрушающее напряжение; a – критическая длина трещины; ν – эффективная поверхностная энергия; E – модуль упругости; V – коэффициент Пуассона; σ_{-1} – предел выносливости деградированного металла.

Растрескивание металла от совместного действия адсорбированного водорода и периодической или переменной нагрузки снижает прочностные свойства металла, усталостную прочность, вызывает кавитационные разрушения, приводит к интенсивному изнашиванию и потере массы металла с поверхности втулок (см. табл.).

Таблица

Усталостная прочность металла в пресной и соленой воде

Металл	σ_{-1} , МПа, при $N_0=5 \cdot 10^7$			
	на воздухе, (σ_{-1B})	в пресной воде (σ_{-1PB})	в соленой воде, (σ_{-1CB})	$(\sigma_{-1PB}) / (\sigma_{-1B})$
Сталь улучшенная (закалка + отпуск), C=0,16%	250	140	65	0,57
Сталь нормализованная, C=0,24%	165	120	-	0,72
Сталь, C=1,09%	289	158	-	0,55
Чугун серый, C=2,6%	120	70	-	0,58
Сталь Cr=13,8%, C=0,1%	344,5	241,1	124	0,70
Алюминий Д1	117,1	53,1	44,8	0,45

Твердость втулки из чугуна СЧ 25, выбракованной по глубине кавитационных кратеров снижена с 250 НВ до 117 НВ. Снижается усталостная прочность и предел выносливости, как в пресной, так и в соленой воде [14].

Заключение

Вибрация цилиндровой втулки, вызванная перекачкой поршня, развивает колебания вдоль по длине втулки от бурта до основания и акустические колебания внутри втулки которые приводят к возникновению растягивающих напряжений и

деформации в поверхностных слоях металла, а взаимодействие с водой создают условия для диффузии водорода во втулку. Диффузия водорода повышает внутренне давление, что приводит к растрескиванию структуры и снижению плотности, прочностных и пластических характеристик (предела прочности, твердости, предела выносливости, относительного удлинения, ударной вязкости).

Причиной появления подбуртовых трещин и кавитационные разрушения цилиндровой втулки является усталость деградированного металла от «водородного растрескивания под напряжением» и

действия циклических растягивающих напряжений. Факторами, повышающими долговечность втулок по подбуртовым трещинам, могут быть: повышение износостойкости скользящей поверхности втулки для стабилизации величины теплового зазора; повышение жесткости втулки за счет увеличения

толщины втулки в подбуртовой зоне; применение металла втулки с малой чувствительностью к «водородному растрескиванию под напряжением» (замена чугуна с пластинчатой формой графита на сферическую) [15].

Литература

1. Пимашенко А.П. Комплексные метод повышения надежности цилиндровых втулок судовых дизелей / Пимашенко А.П., Валишин А.Г. М., изд. «Колос», 2007, 168 с.
2. Кондратьев Н.Н. Отказы и дефекты судовых дизелей. М., изд. «Транспорт», 1985, 152 с.
3. Васильев Б.В. Надежность судовых дизелей. М., изд. «Транспорт», 1989, 184 с.
4. Пимашенко А.П. Кошелев И.Ф. Кавитационные разрушения в малооборотных дизелях. Мурманск, изд. «Кн. изд-во», 1974, 96 с.
5. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М., изд. «Высшая школа», 1980, 408 с.
6. Александров А.В. Сопrotivление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; Под ред. А.В. Александрова. 2е изд.; испр. М., изд. «Высшая школа», 2001, 560 с.
7. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Деформация и разрушения. М., изд. «Машиностроение», 1974, 472 с.
8. Аликин В.Н. Критерии прочности и надежности конструкций / В.Н. Аликин, И.Е. Литвин, Н.В. Ушин. М., изд. «Недра-Бизнесцентр», 2005, 164 с.
9. Суранов Г.И. О поведении водорода при разрушении и трении металлов и сплавов / Г.И. Суранов // Металловедение и термическая обработка металлов, №6, 1998.
10. Полипанов И.С. Влияние ударных нагрузок на изменение электрического потенциала системе металл-жидкость / И.С. Полипанов, А.П. Пимашенко, Л.Н. Дурович, С.И. Кагоницкий // Прикладная химия, № 1, 1978.
11. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах / Б.А. Колачев // Металловедение и термическая обработка металлов, №3, 1999. С. 3-10.
12. Исаев Н.И. Теория коррозионных процессов. М., изд. «Металлургия», 1997, 368 с.
13. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения. М, изд. «Металлургия», 1974, 64 с.
14. Булгаков В.П. Цилиндровая втулка двигателей внутреннего сгорания из борированной стали / В.П. Булгаков, И.Н. Рубан // Морские интеллектуальные технологии, 2018, №4(49), Т4, С. 80-83.
15. Булгаков В.П. Влияние вибрации на кавитационный износ цилиндрической втулки среднеоборотных двигателей / В.П. Булгаков, И.Н. Рубан // Морские интеллектуальные технологии, 2018, №1(39), Т1, С. 135-139.

References

1. Pimashenko A.P. Kompleksnyye metod povysheniya nadezhnosti cilindrovyyh vtulok sudovyh dizelej [Complex method of increasing the reliability of cylinder busing of marine diesel engines]. / Pimashenko A.P., Valishin A.G. M., izd. «Kolos», 2007, 168 s.
2. Kondrat'ev N.N. Otkazy i defekty sudovyh dizelej [Failures and defects of marine diesel engines]. M, izd. «Transport», 1985, 152 s.
3. Vasil'ev B.V. Nadezhnost' sudovyh dizelej [The reliability of marine diesel engines]. - M., izd. «Transport», 1989, 184 s.
4. Pimashenko A.P. Koshelev I.F. Kavitationnyye razrusheniya v malooborotnyh dizelyah [The cavitation damage in low-speed diesel engines]. Murmansk, Kn. izd-vo, 1974, 96 s.
5. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebanij [The theory of mechanical vibrations]. M., izd. «Vysshaya shkola», 1980, 408 s.
6. Aleksandrov A.V. Soprotivlenie materialov [The resistance of materials] / A.V. Aleksandrov, V.D. Potapov, B.P. Derzhavin; Pod red. A.V. Aleksandrova. 2e izd.; ispr. M., izd. «Vysshaya shkola», 2001, 560 s.
7. Fridman Ya.B. Mekhanicheskie svoystva metallov. Deformatsiya i razrusheniya [The mechanical properties of metals. The deformation and the destruction]. M., izd. «Mashinostroenie», 1974, 472 s.
8. Alikin V.N. Kriterii prochnosti i nadezhnosti konstrukcij [The strength and reliability criteria of structures] / V.N. Alikin, I.E. Litvin, N.V. Ushin. M., izd. «Nedra-Biznescentr», 2005, 164 s.
9. Suranov G.I. O povedenii vodoroda pri razrushenii i trenii metallov i splavov [On the behavior of hydrogen during the fracture and the friction of metals and alloys] /G.I. Suranov // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, № 6, 1998.
10. Polipanov I.S. Vliyanie udarnyyh nagruzok na izmeneniye elektricheskogo potentsiala sisteme metall-zhidkost' [The influence of shock loads on the change in the electric potential of the metal-liquid system] / I.S.Polipanov, A.P.Pimashenko, L.N.Durovich, S.I. Kagonickij // Prikladnaya himiya, №1, 1978.
11. Kolachev B.A. Vodorod v metallah i splavah [Hydrogen in metals and alloys] / B.A. Kalachev // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, №3, 1999. s 3-10.
12. Isaev N.I. Teoriya korrozionnykh processov [The theory of corrosion processes]. M., izd. «Metallurgiya», 1997, 368 s.
13. Hekkel' K. Tekhnicheskoe primeneniye mekhaniki razrusheniya [The technical application of fracture mechanics]. M., izd. «Metallurgiya», 1974, 64 s.

14. Bulgakov V.P. Cilindrovaya vtulka dvigatelej vnutrennego sgoraniya iz borirovannoj stali [The cylinder bushing of internal combustion engines made of borated steel] / V.P. Bulgakov, I.N. Ruban // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, № 4 (49), T4, s. 80-83.
15. Bulgakov V.P. Vliyanie vibracii na kavitacionnyj iznos cilindrovoj vtulki sredneoborotnyh dvigatelej [The influence of vibration on the cavitation wear of the cylinder bushing of medium-speed engines] / V.P. Bulgakov, I.N. Ruban // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, № 1 (39), T1, s.135-139.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ирина Николаевна Рубан, ассистент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: irinaruban1979@mail.ru

Владимир Павлович Булгаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: mbulgak@mail.ru

Олеся Викторовна Федорова, кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой иностранных языков, Астраханский государственный технический университет, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: ov_fedorova2005@mail.ru

Irina N. Ruban, Assistant of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva street, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: irinaruban1979@mail.ru

Vladimir P. Bulgakov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva street, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: mbulgak@mail.ru

Olesya V. Fyodorova, Ph.D. (Edu), assistant professor, Head of the Department of Foreign Languages, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva street, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: ov_fedorova2005@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.09.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

УДК 629.5.083.5:621.318

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.031>

Оценка технического состояния корпусов судов с использованием мобильных устройств магнитного типа

С.И. Корягин¹, e-mail: skoryagin@kantiana.ru, Н.Л. Великанов¹, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,
О.В. Шарков¹, e-mail: osharkov@kantiana.ru

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. Оценка технического состояния корпуса судна проводят с применением диагностических датчиков. С помощью них измеряются, например, толщина обшивки, параметры бухтин, вмятин, гофрировки. Процессы эти трудоемкие и достаточно сложные. Проблемой автоматизации таких операций является удержание измерительной аппаратуры на криволинейной поверхности корпуса судна и перемещение аппаратуры по ней. Одним из вариантов решения проблемы является применение подвижных тележек с установленными на них магнитными устройствами. В данной работе исследуются вопросы влияния кривизны обшивки корпуса судна на параметры подвижной магнитной системы. Представлены расчетные схемы для различных компоновок, физические и математические модели. Анализ полученных математических выражений позволил сделать выводы по вариантам размещения, по зазору и скорости его изменения, клиренсу транспортного устройства, углу между опорной поверхностью и торцевой плоскостью магнита, который приводит к уменьшению силы притяжения. Учен начальный зазор. Проведены расчеты зависимостей изменения радиуса кривизны корпуса судна от колеи и конструктивной схемы мобильных устройств.

Ключевые слова: электромагнитные элементы, мобильное устройство, измерение остаточных толщин, корпус судна, дефектация.

Assessment of the technical condition of ship hulls using mobile magnetic devices

Sergey I. Koryagin¹, e-mail: skoryagin@kantiana.ru, Nikolay L. Velikanov¹, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,
Oleg V. Sharkov¹, e-mail: osharkov@kantiana.ru

¹Immanuel Kant Baltic Federal University

Abstract. The assessment of the technical condition of the vessel's hull is carried out using diagnostic sensors. They are used to measure, for example, the thickness of the skin, the parameters of camber, dents, corrugations. These processes are time-consuming and quite complex. The problem of automation of such operations is the retention of measuring equipment on the curved surface of the hull of the vessel and the movement of equipment along it. One of the solutions to the problem is the use of movable trolleys with magnetic devices installed on them. In this paper, the issues of the influence of the curvature of the hull covering on the parameters of the mobile magnetic system are investigated. Calculation schemes for various layouts, physical and mathematical models are presented. The analysis of the obtained mathematical expressions allowed us to draw conclusions on the placement options, on the gap and the speed of its change, the clearance of the transport device, the angle between the support surface and the end plane of the magnet, which leads to a decrease in the force of attraction. The initial gap is taken into account. Calculations of the dependences of changes in the radius of curvature of the hull of the vessel on the track and the design scheme of mobile devices are carried out.

Key words: electromagnetic elements, mobile device, measurement of residual thicknesses, ship hull, defecation.

Введение

Износ и деформации корпуса судна, развитие коррозии и появление трещин снижают местную и общую прочность судна, что может явиться причиной аварии [1–6].

Поэтому для безопасной эксплуатации судна необходимо знать количественные характеристики его обшивки, параметры остаточных деформаций, наличие трещин, износ сварных швов и т.п., чтобы вовремя произвести профилактический или капитальный ремонт.

Оценка технического состояния, определение необходимости и объема ремонта корпуса судна обеспечивается дефектацией. При проведении дефектации корпуса фиксируют износы элементов конструкций, остаточные деформации, наличие разрушений, трещин, характер и размер их распространения. При оценке износа определяют: среднее утонение связей корпуса, скорость среднего утонения, глубину наиболее развитых язв, площадь распространения язвенной коррозии и степень ее распространения.

Оценку остаточных толщин корпусов судов определяют с помощью разрушающих и неразрушающих методов контроля [7].

Методы разрушающего контроля в последнее время практически не применяются, а среди неразрушающих наибольшее распространение получили методы с применением диагностических датчиков [8–10].

Для перемещения диагностических датчиков по поверхности корпуса судна наиболее эффективным является использование специальных мобильных устройств магнитного типа. Они позволяют автоматизировать процесс дефектации, облегчить труд дефектовщиков и создать предпосылки для качественной объективной оценки технического состояния корпуса.

Несмотря на перспективность применения мобильных устройств, вопросы их проектирования и применения, особенно в сфере судостроения мало разработаны.

В данной статье приведены результаты теоретического исследования влияния кривизны

судовых корпусов на конструктивную компоновку мобильных устройств.

1. Современное состояние вопроса применения мобильных устройств в судостроении

Увеличение объема информации о техническом состоянии корпуса судна позволит определить скорость износа обшивки корпуса с учетом условий эксплуатации судна, что даст возможность прогнозировать дальнейшее состояние корпусов, их ремонт и эксплуатацию [11].

С помощью мобильных устройств можно производить оценку остаточных толщин бортовой обшивки корпуса судна, а также замер стрелок прогиба и размеров вмятин, бухтин и гофрировки.

В качестве ультразвуковых толщиномеров могут использоваться портативные толщиномеры с цифровой индикацией. Опыт эксплуатации этих приборов на судоремонтных предприятиях показал, что приборы хорошо работают на гладкой поверхности при ее соответствующей подготовке, а также на равномерно корродированной поверхности при ее качественной подготовке.

Отдельные толщиномеры хорошо работают на гладкой, а также на язвенно корродированной поверхности при ее тщательной подготовке. Существуют универсальные приборы, позволяющие производить измерения на всех видах поверхностей.

Для определения остаточных толщин возможно также применение ультразвуковых толщиномеров и ультразвуковых дефектоскопов, имеющих глубиномерное устройство.

Учитывая высокую эффективность работы универсальных толщиномеров на всех видах поверхностей корпуса судна, их применение для измерения остаточных толщин с использованием мобильных устройств предпочтительно.

При измерении толщин ультразвуковыми толщиномерами требуется тщательная подготовка поверхности для обеспечения акустического контакта датчика прибора с контролируемой поверхностью.

Подготовка поверхности сводится к удалению с обшивки корпуса судна продуктов обрастания, неплотно держащейся краски, ржавчины и окалины, и др. Зачистка поверхности со стороны ввода ультразвуковых колебаний обычно осуществляется с помощью электро- или пневмотурбинки. Затем на очищенную поверхность наносится контактная жидкость.

Дефекты, имеющие выход на поверхность (трещины, поры), можно обнаружить с помощью методов: магнито-порошкового; рентгенографического; гаммаграфического; ультразвукового; капиллярного. Такие методы можно применять как для выявления трещин, так и для определения размеров и глубины их распространения.

Наиболее актуальной в оценке технического состояния корпуса судна является автоматизация процесса измерения остаточных толщин бортовой обшивки.

Причем масса перевозимого оборудования для подготовки поверхности к измерению (электро- или пневмотурбинка, баллон под давлением с жидкостью для обеспечения акустического контакта) и

проведения измерений (датчик ультразвукового толщиномера) незначительна.

Для перемещения такого оборудования можно использовать мобильные транспортные устройства магнитного типа.

Данные устройства представляют собой платформу, установленную на колесной базе, притягиваемую электромагнитами к корпусу судна. Они могут перемещаться по прямолинейным и криволинейным судовым поверхностям, расположенным горизонтально, под углом и даже вертикально.

Перспективной также представляется оценка технического состояния подводной части корпуса судна и винторулевого устройства с помощью телевизионной камеры, установленной на мобильном устройстве, перемещающемся под водой.

Примером такой реализации является транспортное устройство «Скан», оборудованное телевизионной камерой, работающей в инфракрасном свете, и инфракрасными прожекторами.

2. Влияние кривизны корпуса судна на конструктивные особенности мобильных устройств

Корпус судна, выполненный по теоретическому чертежу, с геометрической точки зрения представляет собой сложную криволинейную поверхность, образованную радиусами различной кривизны [12].

Основными характеристиками любого мобильного устройства являются: главные размеры (база, клиренс, колея); минимальные радиусы кривизны преодолеваемой поверхности в продольном и поперечном направлениях; скорость; масса; грузоподъемность.

Анализ различных мобильных устройств показывает, что в качестве электромагнитных элементов в основном используются два их типа: электромагниты броневого типа и электромагниты с магнитопроводом в виде колесной пары.

Характерной особенностью электромагнита броневого типа является то, что он располагается над поверхностью передвижения с некоторым зазором, который существенно влияет на силу притяжения.

Причем чем меньше зазор, тем больше сила притяжения при прочих равных условиях. В то же время зазор прямым или косвенным образом определяет клиренс мобильного устройства, что сказывается на его способности перемещаться по криволинейным поверхностям и преодолевать препятствия в виде выступов без задевания.

С этой точки зрения необходимо так разместить магнитные элементы на платформе транспортного устройства, чтобы обеспечить относительную стабильность зазора между магнитом и опорной поверхностью при изменении кривизны последней и обеспечить максимально возможный клиренс мобильного устройства.

На рис. 1 представлены возможные варианты конструктивной схемы мобильных устройств магнитного типа на колесной базе.

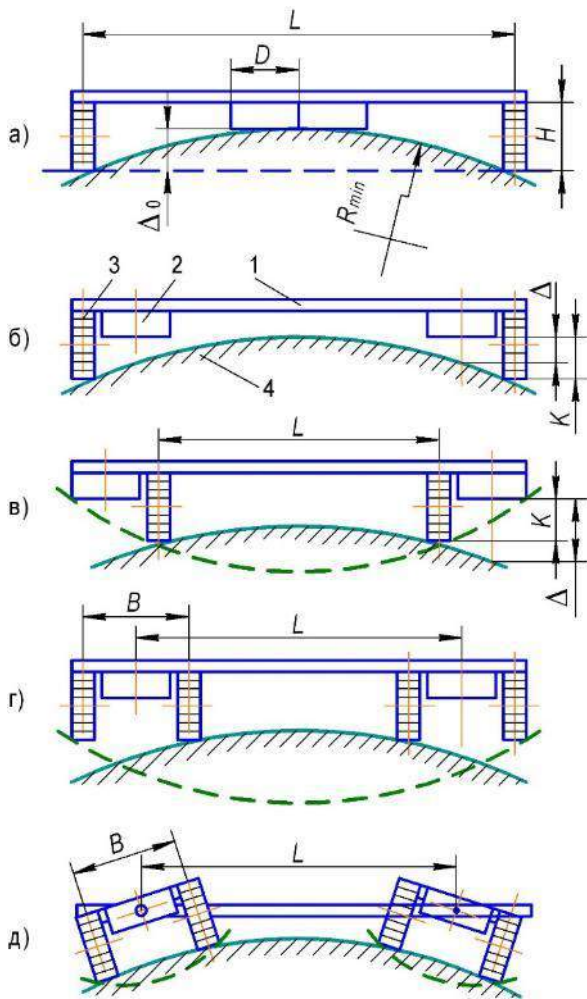


Рис. 1. Конструктивные схемы мобильного устройства: 1 – платформа; 2 – электромагнит; 3 – колесная база; 4 – опорная поверхность.

Введем следующие обозначения: L – колея мобильного устройства; B – колея колесной тележки; K – клиренс мобильного устройства; D – диаметр магнита; H – расстояние (высота) от плоской поверхности до базы мобильного устройства; R – радиус кривизны опорной поверхности; Δ_0 и Δ – величины начального и текущего зазоров между магнитом и опорной поверхностью;

Текущее значение зазора Δ и скорость его изменения $v_\Delta = d\Delta/dR$ зависят от радиуса кривизны корпуса судна и вариантов размещения магнитов на платформе мобильного устройства.

Для конструктивных схем «а»–«д» мобильного устройства получены формулы для определения текущего значения зазора, при его движении, скорости изменения зазора и величины клиренса (верхний знак относится к вогнутым, нижний – к выпуклым опорным поверхностям):

$$\begin{cases} \Delta = \Delta_0 \pm R \mp \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \\ v_\Delta = \pm 1 \mp \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}}} ; \\ K = \Delta_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta = \Delta_0 \pm \sqrt{R^2 - \frac{(L-D)^2}{4}} \pm \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \\ v_\Delta = \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(L-D)^2}{4R^2}}} \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}}} ; \\ K = \Delta_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta = \Delta_0 \pm \sqrt{R^2 - \frac{(L+D)^2}{4}} \pm \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \\ v_\Delta = \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(L+D)^2}{4R^2}}} \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}}} ; \\ K = H \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta = \Delta_0 \pm \sqrt{R^2 - \frac{(L \mp D)^2}{4}} \pm \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \\ v_\Delta = \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(L \mp D)^2}{4R^2}}} \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}}} ; \\ K = H \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta = \Delta_0 \pm R \mp \sqrt{R^2 - \frac{B^2}{4}} \\ v_\Delta = \pm 1 \mp \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{B^2}{4R^2}}} ; \\ K = H \end{cases} \quad (5)$$

Приняв для схем «а» и «д» $\Delta = 0$, а для схем «б», «в», «г» $\Delta = K/2$, получим, для рассмотренных компоновочных схем, значения минимальных радиусов кривизны опорной поверхности:

$$R_{min} = \frac{L^2}{8\Delta_0} + \frac{\Delta_0}{2} ; \quad (6)$$

$$R_{min} = \sqrt{\frac{L^2}{4} + \frac{(2LD - D^2 - \Delta_0^2)^2}{16\Delta_0^2}} ; \quad (7)$$

$$R_{min} = \sqrt{\frac{(L + \hat{A})^2}{4} + \frac{(2LD + D^2 - \Delta_0^2)^2}{16\Delta_0^2}} ; \quad (8)$$

$$R_{min} = \frac{B^2}{8\Delta_0} + \frac{\Delta_0}{2} ; \quad (9)$$

$$R_{min} = \frac{B^2}{8\Delta_0} + \frac{\Delta_0}{2} . \quad (10)$$

3. Результаты расчетов и дискуссия

Анализ полученных выражений (1)–(6) позволяет сделать следующие выводы:

1. Для конструктивной схемы «д» зазор и скорость его изменения ниже, чем в схемах «а»–«г», так как $V \ll L$.

2. Клиренс мобильного устройства для конструктивных схем «в»–«д» выше, чем для схем «а» и «б» и определяется расстоянием от опорной поверхности до платформы устройства.

3. Для конструктивных схем «б», «в» и «г» между опорной поверхностью и торцевой плоскостью магнита образуется угол, который приводит к уменьшению силы притяжения.

На рис. 2 показано изменение минимального радиуса кривизны корпуса судна (опорной поверхности) в зависимости от колеи и конструктивной схемы мобильных устройств.

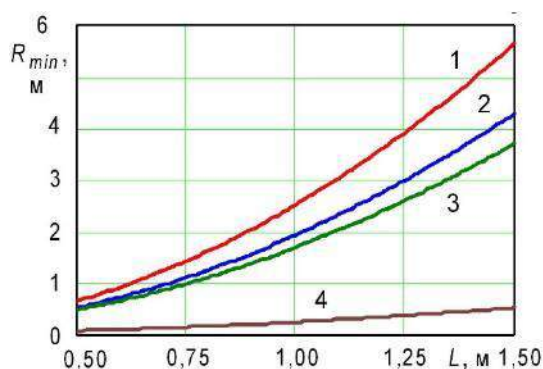


Рис. 2. Влияние колеи мобильного устройства на радиус кривизны опорной поверхности для конструктивных схем: 1 – «а»; 2 – «б»; 3 – «в»; 4, 5 – «г» и «д».

Расчеты выполнены по зависимостям (6)–(10) при следующих конструктивных параметрах мобильного устройства: колея $L = 0,5 \dots 1,5$ м; колея колесной тележки $B = 0,2 \dots 0,5$ м; начальный зазор $\Delta_0 = 0,05$ м; диаметр магнита $D = 0,15L$.

Как видно из полученных результатов увеличение колеи мобильного устройства приводит к

нелинейному росту необходимого радиуса опорной поверхности, по которой оно может передвигаться. При этом для конструктивных схем «а»–«в» минимальный радиус кривизны должен быть больше в 7...10 раз, чем для схем «г»–«д».

На рис. 3 показано изменение минимального радиуса кривизны опорной поверхности для мобильного устройства по конструктивной схеме «д» в зависимости от величины начального зазора и колеи колесной тележки.

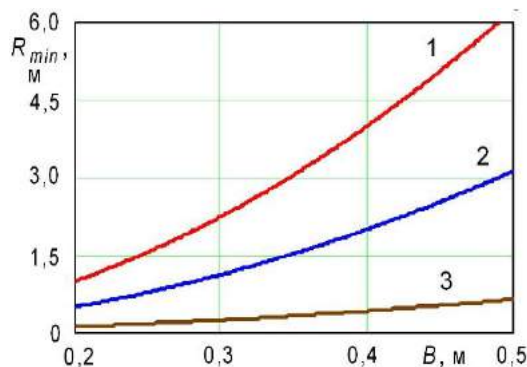


Рис. 3. Влияние колеи колесной тележки на радиус кривизны опорной поверхности при начальном зазоре: 1 – $\Delta_0 = 0,005$ м; 2 – $\Delta_0 = 0,01$ м; 3 – $\Delta_0 = 0,05$ м.

Как видно из полученных результатов увеличение колеи тележки с 0,2 до 0,5 м (в 2,5 раза) приводит к нелинейному росту необходимого радиуса опорной поверхности в 5,1...6,2 раза. При этом увеличение начального зазора в 10 раз приводит уменьшению требуемого радиуса кривизны в 8,5...9,9 раза.

Заключение

Проведен анализ конструктивных схем мобильных устройств магнитного типа с учетом различных параметров: колеи; клиренса; диаметра магнита; радиуса кривизны опорной поверхности.

Установлено, что наиболее приемлемой является конструктивная схема «д». Тележки подвешиваются к платформе шарнирно с тем, чтобы обеспечить возможность прижима обоих колес к криволинейному профилю опорной поверхности

Литература

1. Feng L., Li D., Shi H., Zhang Q., Wang, S. A study on the ultimate strength of ship plate with coupled corrosion and crack damage // Ocean engineering. 2020. V.200. 106950.
2. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier // Journal of marine science and application. 2017. V.16(3). Pp. 334-343.
3. Lampe J., Hamann R. Probabilistic model for corrosion degradation of tanker and bulk carrier // Marine structures. 2018. V.61. Pp. 309-325.
4. Бурнашева Н.В., Кудрин М.А. Влияние коррозионного износа на прочность корпусных конструкций морских судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. №4(394). С. 76-81.
5. Барышников С.О. Влияние износа корпуса судна на обеспечение его общей прочности // Речной транспорт (XXI век). 2010. №5(47). С. 78-81.
6. Китаев М.В., Компанец В.А., Кулеш В.А., Суков О.Э. Разработка предложений к назначению надбавок на износ наружной обшивки судов ледовых классов и ледоколов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2018. №52-53. С. 35-46.
7. Испытательная техника: Справочник в 2-х кн. / под ред. В.В. Ключева. Москва: Машиностроение, 1982. Кн.1. 528 с., Кн.2. 559 с.
8. Tang F., Yu Y. Nondestructive Testing Method for Welding Quality in Key Parts of Ocean-going Ships // Journal of coastal research. 2020. V.110. Pp.91-94.
9. Наливайко А.В., Сюсюка Е.Н. Анализ физических основ неразрушающих методов контроля судовых технических средств // Наука, техника и образование. 2017. №6(36). С. 9-12.

10. Хурсан А.А., Бендиков А.В. Инновации в неразрушающих методах контроля в судостроении на примере ОАО судостроительный завод «Северная верфь» // В мире неразрушающего контроля. 2011. №3(53). С. 27-30.
11. Пашеева Т.Ю., Попов Л.В. Технический контроль как один из способов управления качеством судоремонта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т.13. №2. С. 232-243.
12. Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Напряженное состояние полимерных покрытий, примененных при ремонте судовых корпусных конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №3-3(45). С. 37-42.

References

1. Feng L., Li D., Shi H., Zhang Q., Wang, S. A study on the ultimate strength of ship plate with coupled corrosion and crack damage. Ocean engineering. 2020. V.200. 106950.
2. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier. Journal of marine science and application. 2017. V.16(3). Pp. 334-343.
3. Lampe J., Hamann R. Probabilistic model for corrosion degradation of tanker and bulk carrier. Marine structures. 2018. V.61. Pp. 309-325.
4. Burnasheva N.V., Kudrin M.A. Vlijanie korrozionnogo iznosa na prochnost' korpusnyh konstrukcij morskikh sudov [Effect of corrosion wear on the strength of hull structures of marine vessels] Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2020. No4(394). Pp. 76-81.
5. Baryshnikov S.O. Vlijanie iznosa korpusa sudna na obespechenie ego obshhej prochnosti [The effect of wear on the hull of the vessel to ensure its overall strength] Rechnoj transport (XXI vek). 2010. No5(47). Pp. 78-81.
6. Kitaev M.V., Companets V.A., Kulesh V.A., Surov O.E. Razrabotka predlozhenij k naznacheniju nadbavok na iznos naruzhnoj obshivki sudov ledovyh klassov i ledokolov [Development of proposals for the appointment of allowances for the wear of the outer skin of ice-class vessels and icebreakers] Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2018. No52-53. Pp. 35-46.
7. Ispytatel'naja tehnika: Spravochnik v 2-h kn. pod red. V.V. Kljueva. [Testing equipment: Handbook in 2 books. ed. V.V. Klyueva] Moskva: Mashinostroenie, 1982. Kn. 1. 528 p., Kn.2. 559 p.
8. Tang F., Yu Y. Nondestructive testing method for welding quality in key parts of ocean-going ships. Journal of coastal research. 2020. V.110. Pp.91-94.
9. Nalivaiko A.V., Syusyuk E.N. Analiz fizicheskikh osnov nerazrushajushhih metodov kontrolja sudovyh tehniceskikh sredstv [Analysis of the physical foundations of non-destructive methods of control of ship technical means] Nauka, tehnika i obrazovanie. 2017. No6(36). Pp. 9-12.
10. Khursan A.A., Bendikov A.V. Innovacii v nerazrushajushhih metodah kontrolja v sudostroenii na primere OAO sudostroitel'nyj zavod «Severnaja verf» [Innovations in shipbuilding nondestructive inspection as exemplified by PLC ship-building factory «Northern shipyard»] V mire nerazrushajushhego kontrolja. 2011. No3(53). Pp. 27-30.
11. Pasheeva T.Yu., Popov L.V. Tehnicheskij kontrol' kak odin iz sposobov upravlenija kachestvom sudoremonta [Technical control as one of the ways of ship repair quality management] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2021. V.13. No2. Pp. 232-243.
12. Koryagin S.I., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Naprjazhennoe sostojanie polimernyh pokrytij, primenennyh pri remonte sudovyh korpusnyh konstrukcij [The stress state of reinforced polymeric coatings used by repair of ship hull structures] Morskie intellektual'nye tehnologii. 2019. No3-3. Pp. 37-42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Иванович Корягин, доктор технических наук, профессор, директор инженерно-технического института, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Sergey I. Koryagin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Director of the Engineering and technology institute, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Nikolay L. Velikanov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of mechanical engineering and technical systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Олег Васильевич Шарков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения и технических систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Oleg V. Sharkov, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of the Department of engineering and technical systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 20.11.2021

Исследование структуры и фрикционных свойств нового композиционного фрикционного материала

О.В. Башков¹, e-mail: bashkov_ov@mail.ru, А.А. Афанасьева¹, e-mail: ani.afanasjeva@gmail.com

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Аннотация. В статье приведены результаты исследования фрикционных свойств и структуры нового композиционного фрикционного материала (КФМ). В ходе исследования были разработаны восемь перспективных составов КФМ, полученных методом порошковой металлургии. Фрикционные испытания новых материалов проводились на испытательной машине на трение и износ ИИ5018, оснащённой программным комплексом Tester 3.0, позволяющим точно фиксировать изменение момента трения в течение испытания с построением графика и автоматическим расчётом параметров трения. Методика испытаний позволила имитировать условия фрикционного взаимодействия, возникающие в муфтах электроприводов, применяемых в наземном и морском транспорте. По результатам испытаний оценивались величина коэффициента трения и его стабильность на протяжении цикла испытания и в диапазоне рабочих регулировок электропривода, а также износостойкость КФМ. На основании исследований структуры поверхности трения и качественной оценки стабильности коэффициента трения был определён оптимальный состав КФМ, способный обеспечить стабильную и безопасную работу электропривода в диапазоне рабочих регулировок.

Ключевые слова: композиционный фрикционный материал, порошковая металлургия, коэффициент трения, структура поверхности трения, диссипация

Study of the structure and frictional properties of a new composite friction material

Oleg V. Bashkov¹, e-mail: bashkov_ov@mail.ru, Anna A. Afanaseva¹, e-mail: ani.afanasjeva@gmail.com

¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a study of the frictional properties and structure of a new composite frictional material (CFM). In the course of the study, eight promising CFM compositions were developed, obtained by the method of powder metallurgy. Friction tests were carried out on a friction and wear testing machine II5018, equipped with the software package Tester 3.0, which allows registering the change in friction moment during the test with plotting and automatic calculation of friction parameters. The test technique made it possible to simulate the conditions of frictional interaction arising in the couplings of electric drives used in land and sea transport. After the tests, the value of the friction coefficient, its stability during the test cycle and in the range of operating adjustments of the electric drive and the wear resistance of the CFM were evaluated. Based on the analysis of the structure of the friction surface and a qualitative assessment of the stability of the coefficient of friction, the optimal composition of the CFM capable of ensuring stable and safe operation of the electric drive in the range of operating adjustments was determined.

Key words: composite friction material, powder metallurgy, coefficient of friction, friction surface structure, dissipation

Введение

Стремительное развитие различных отраслей промышленности диктует новые требования к современным материалам. Порошковая металлургия обеспечивает получение широкого спектра материалов, отвечающих самым высоким запросам современной промышленности [1].

Для предотвращения перегрузки двигателя при передаче вращательного момента от серводвигателя к приводному валу, как правило, применяют предохранительные муфты. Сцепление осуществляется за счет прижатия колодки или контактных площадок из фрикционного материала, впрессованных в металлический диск, к диску сцепления. Тяжелые условия эксплуатации оборудования на морских и речных судах накладывают высокие требования по надежности функционирования и стабильности фрикционных свойств предохранительных муфт при их длительной работе [2-5]. Надежность работы фрикционных муфт во многом зависит от правильного выбора фрикционного материала. Новый композиционный фрикционный материал (КФМ) разрабатывался для работы в составе фрикционной муфты, применяемой в электроприводах наземного и морского

транспорта. Муфта преобразует вращательное движение в поступательное, а так же служит для ограничения величины передаваемого момента и, тем самым, ограничивает усилие на шибере, предохраняя электродвигатель от перегрузки, а также гасит кинетическую энергию ротора при резкой остановке двигателя [6, 7].

Основными критериями работоспособности фрикционных муфт являются: прочность сцепления, высокий коэффициент трения и его стабильность; износостойкость и теплостойкость поверхности трения [8-10]. В данной работе проводилось исследование фрикционных свойств и структуры новых составов КФМ [11], был обоснован выбор оптимального состава материала.

1. Материалы и методы исследования

В ходе факторного планирования были получены составы новых перспективных КФМ, представленные в таблице 1.

Таблица 1
Экспериментальные составы КФМ

№	Массовая доля в %					
	Cu	SiO ₂	BaSO	C	Zn	Fe
1	30,0	5,0	3,0	3,0	1,0	58,0
2	15,0	5,0	3,0	3,0	1,0	74,0
3	30,0	3,0	3,0	3,0	1,0	60,0
4	15,0	3,0	3,0	3,0	1,0	75,0
5	30,0	5,0	1,5	3,0	1,0	59,5
6	15,0	5,0	1,5	3,0	1,0	74,5
7	30,0	3,0	1,5	3,0	1,0	61,5
8	15,0	3,0	1,5	3,0	1,0	76,5

Исследование фрикционных свойств нового КФМ проводилось на машине для испытаний материалов на трение и износ ИИ5018, по схеме «диск-колодка». Для оценки свойств материала была разработана методика, позволяющая имитировать условия фрикционного взаимодействия нового КФМ и материала контртела, изготовленного из закалённой стали 60, в составе фрикционной муфты.

На первом этапе проводилась приработка рабочей поверхности образцов относительно поверхности контртела, с целью создания постоянного пятна контакта [12]. Оптимальный диапазон значений удельного давления на поверхность трения был рассчитан из условия передаваемого фрикционной муфтой момента.

На втором этапе эксперимента проводились фрикционные испытания новых составов КФМ. Условия испытания (скорость вращения контртела и время фрикции) были постоянными, и соответствовали значениям, возникающим при работе муфты в составе электропривода. Усилие прижима исследуемого образца к поверхности контртела осуществлялось ступенчато, в диапазоне давлений на поверхность трения от 0,14 до 5 МПа. Данные значения соответствуют диапазону регулировки при работе муфты электропривода.

В работе приведены исследования 8 перспективных составов КФМ. Испытанию и анализу подвергалось по три образца каждого состава. Каждый образец испытывался с одним усилием прижима к контртелу минимум по 4 раза.

2 Результаты и их обсуждение

Значение коэффициента трения рассчитывалось на основании значений момента трения, полученных при испытании образцов КФМ. Графики изменения значений коэффициента трения новых КФМ в зависимости от изменения значений давления приведены на рис. 1.

Построение графиков было выполнено на основании анализа значений момента трения в результате расчёта среднего значения коэффициента трения КФМ. Данный расчёт стал возможным в связи с тем, что программное обеспечение Tester 3.0, управляющее машиной для испытаний на трение и износ, позволяет выполнять фиксацию значений момента трения, возникающего в процессе фрикционного взаимодействия между КФМ и контртелом с построением графика изменения

момента трения на протяжении всего цикла испытания.

Трение по своей природе является сложным термодинамическим процессом, сопровождающимся изменением топографии поверхностей, диссипацией энергии, массообменом между трущимися телами и средой, изменением структуры и физико-механических свойств поверхностных слоёв вследствие адгезионно-деформационных явлений [13, 14].

По результатам испытаний всех исследуемых составов КФМ была отмечена тенденция получения высоких значений коэффициента трения, более 1, на первой ступени испытания с минимальным возможным давлением на поверхность трения. С увеличением значений давления, значения коэффициента трения КФМ уменьшались до нормальных значений для пары трения металл-керамика - закалённая сталь, порядка 0,7 - 0,6 единиц. Так как данная тенденция наблюдалась у всех составов КФМ, то можно предположить, что подобная величина коэффициента трения не является достоверной и объясняется особенностью работы механической части узлов машины для испытания на трение и износ при низких нагрузках на образец [15].

Стабильностью коэффициента трения принято считать его малую изменчивость при изменении параметров скорости, давления и температуры. В данных исследованиях стабильность коэффициента трения оценивалась по изменению параметра давления КФМ, оказываемого на поверхность трения, а так же изменчивости значения давления в течение цикла испытания на одной нагрузке при многократном повторении фрикционного взаимодействия с контртелом.

Наиболее стабильным коэффициентом трения при изменении величины давления на поверхности контртела, а так же в параллелях испытаний, обладал состав КФМ №2. Структура поверхности трения образца КФМ состава №2 приведена на рис. 2.

Наиболее нестабильные значения коэффициента трения, в том числе по параллелям испытаний, показал состав КФМ №4.

Для проведения анализа структуры контактной поверхности трения на растровом электронном микроскопе были отобраны образцы КФМ трёх составов: образец, обладающий самым стабильным коэффициентом трения по результатам проведённых испытаний – состав №2; образец, обладающий самым не стабильным коэффициентом трения – состав №4; и образец с изменяющимся коэффициентом трения, но не в большом диапазоне величин – состав №1.

На поверхности трения КФМ состава №2 (рис. 2) чётко просматриваются ровные борозды – каналы трения, эти каналы свидетельствуют о равномерном снятии материала в процессе трения, так же по ним качественно производится подача смазывающих компонентов на поверхность трения.

В процессе трения фрикционного материала о стальную закалённую поверхность контртела происходит равномерное снятие тонкого слоя КФМ. Компоненты железной матрицы, медных включений, твёрдых и жидких смазок, фрикционного

наполнителя смешиваются, с образованием диссипативных структур [11].

О качестве процесса трения так же свидетельствуют отсутствующие на поверхности образца крупные вырывы материала, сама поверхность выглядит однородной. Поверхность

трения образца КФМ состава №1 выглядит менее однородной (рис. 3), чем у образца КФМ состава №2. На поверхности так же присутствуют борозды – каналы трения, но они распределяются не равномерно, имеют различную глубину и ширину (рис. 3, б).

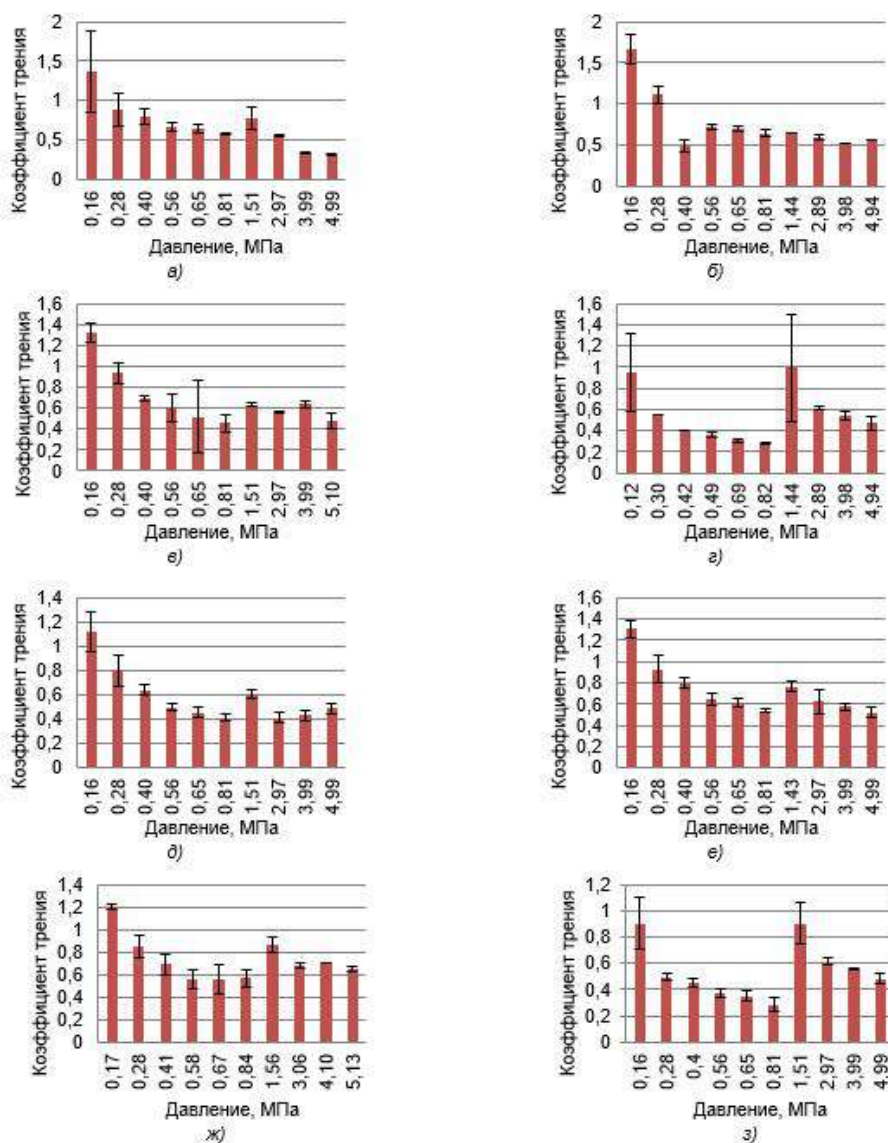


Рис. 1 – Диаграммы изменения значений коэффициента трения в зависимости от давления на фрикционную поверхность для КФМ составов: а) – №1; б) – №2; в) – №3; г) – №4; д) – №5; е) – №6;

Так же были обнаружены участки с чешуйчатым строением (рис. 3, г), что свидетельствует о различных механизмах, происходящих в процессе снятия фрикционного материала. На поверхности трения в не большом количестве были обнаружены не большие по размеру вырывы материала (рис. 3, а, в). Данные явления могут свидетельствовать о неравномерном процессе снятия фрикционного материала и его наволакивании на поверхность трения. Это в свою очередь создаёт не стабильные условия для фрикционного взаимодействия и может повлиять на надёжность работы муфты электропривода.

Структура поверхности трения образца КФМ №4 выглядит более изношенной, по сравнению со структурой образцов №1 и №2. На рис. 4, а хорошо

видны достаточно глубоко проникающие в поверхность материала борозды, равномерно распределяющиеся по поверхности трения. Подобный вид структуры может свидетельствовать о наличии явления схватывания фрикционного материала с материалом контртела.

Данное явление так же подтверждают, присутствующие на материалы вырывы (рис. 4, б), образующиеся при отрыве слоистых пластинок КФМ (рис. 4, в). Деформация поверхности трения материала сопровождается диссипацией механической энергии [18], которая связана с процессами внутреннего трения при микролокальной пластической деформации, инициированной контактно-фрикционным взаимодействием [16, 17].

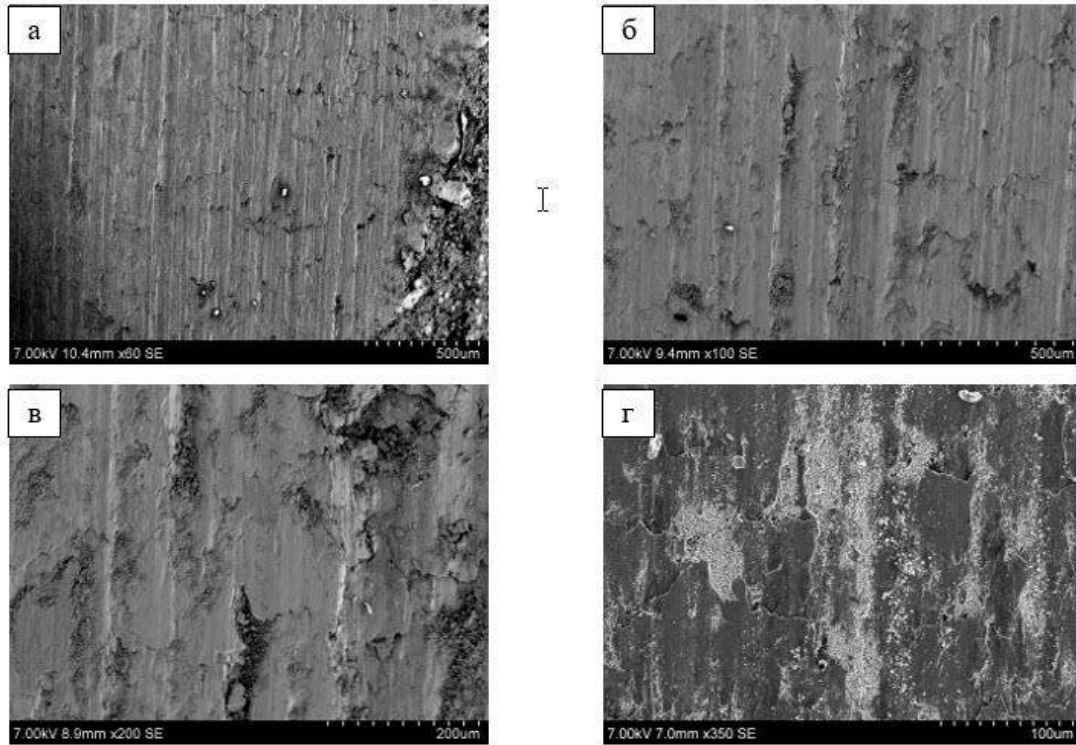


Рис. 2 – Структура поверхности трения образца КФМ состава №2
а – увеличение x60; б - увеличение x100; в - увеличение x200; г - увеличение x350

Чем активнее происходит процесс диссипации механической энергии, тем выше значения коэффициента трения КФМ, но вместе с тем, проявляются явления нестабильности его значений,

повышается изнашиваемость материала, что в свою очередь негативно влияет на стабильность работы муфты электропривода.

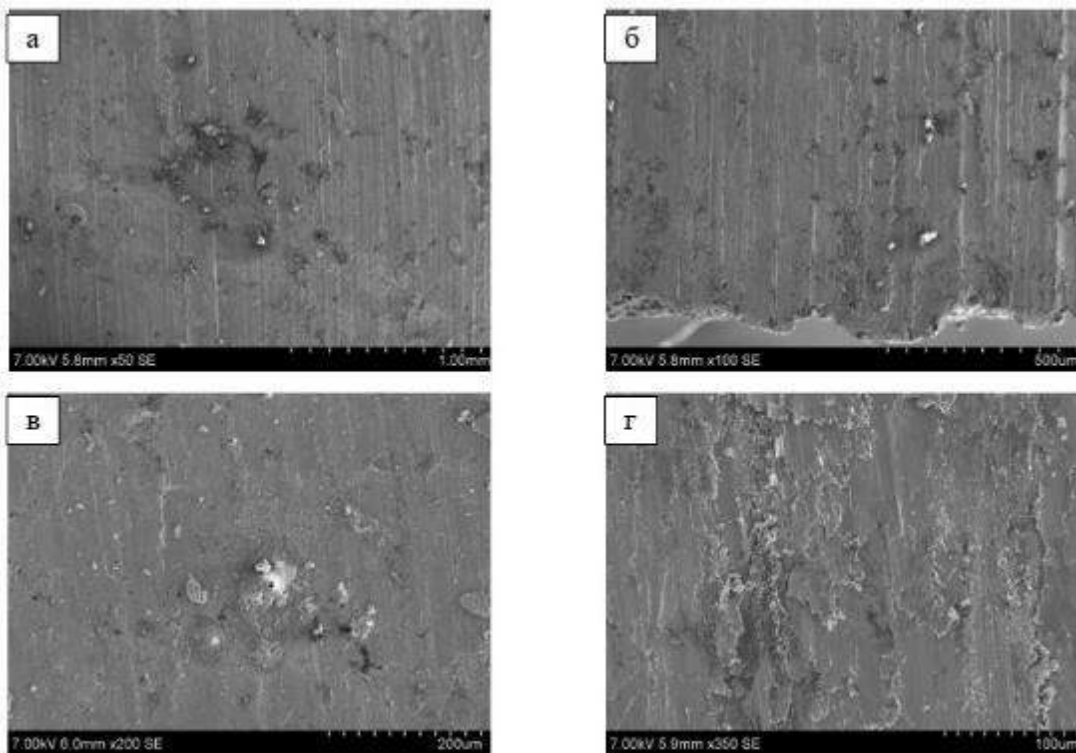


Рис. 3 – Структура поверхности трения образца КФМ состава №1
а – увеличение x50; б - увеличение x100; в - увеличение x200; г - увеличение x350

На поверхности трения образца КФМ №4 обнаруживаются множественные небольшие глобулярные светлые частицы, которые могут

являться продуктами, образовавшимися в результате процесса наволакивания фрикционного материала на продукты износа материала контртела.

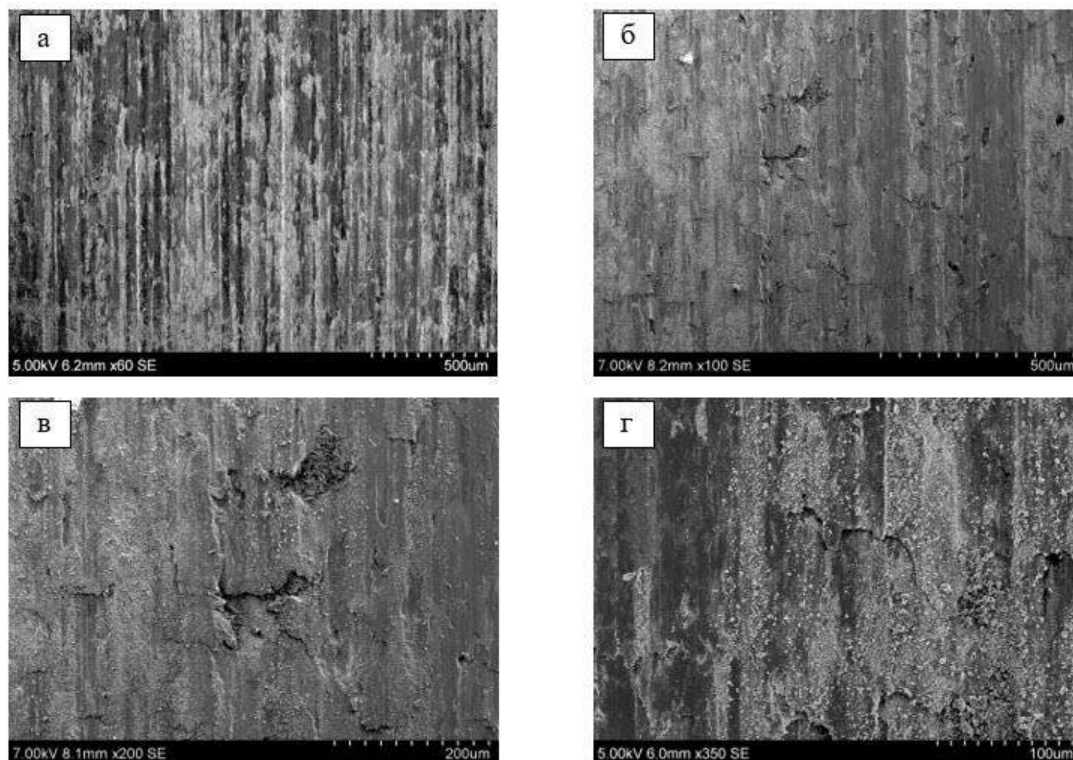


Рис. 4 – Структура поверхности трения образца КФМ состава №4
а – увеличение x60; б - увеличение x100; в - увеличение x200; г - увеличение x350

Подобный процесс может сопровождаться адгезией, которая при определённых условиях может привести к микрорезанию, что в свою очередь увеличит значения работы трения [18].

Заключение

Надёжность работы электропривода во многом зависит от стабильной работы фрикционной муфты, так как именно механизм муфты выполняет основную функциональную задачу по переводу вращательного момента, создаваемого электродвигателем, в поступательное движение шибера электропривода. Кроме того, фрикционная муфта служит для ограничения величины передаваемого момента и, тем самым, предохраняет электродвигатель привода от возможной перегрузки, а также для погашения

кинетической энергии ротора, которая возникает в конце перевода стрелки.

По результатам проведённых исследований восьми новых перспективных КФМ, полученных методом порошковой металлургии, был выявлен состав материала, обладающий оптимальными функциональными свойствами. Состав КФМ №2 [19] обладает стабильным коэффициентом трения в диапазоне рабочих регулировок усилия прижима фрикционных элементов к материалу контртела. Поверхность трения данного материала выглядит однородной, отсутствуют следы глубоких борозд и вырывов, что свидетельствует о равномерном изнашивании материала, отсутствии наволакивания продуктов трения на поверхность контртела.

Литература

1. V.M. Kryachek. "Friction composites: Traditions and new solutions (review). I. Powder materials". Powder Metallurgy and Metal Ceramics volume 43, pages581–592 (2004)
2. Kurtze L. "Innovative solutions to reduce the transfer of structure borne noise in couplings". Proceedings of the International Congress on Acoustics, (2019).
3. Zhu J., Chen L., Peng C. "Torque Coordination Control during Mode Transitions for a HybridShip". Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, 28 (2017).
4. Пат. 2644200 Российская Федерация, МПК В 63 Н 1/14 В 63 Н 23/34. Гребной винт с предохранительной муфтой / Геращенко Э.А.; заявитель и патентообладатель Геращенко Э.А., Геращенко Г.А. №2644200; заявл. 05.06.12; опубл. 08.02.2018.
5. Пат. 158698 Российская Федерация, МПК В 61 J 1/10. Самоходный трансбордер с электромагнитофрикционным приводом / Гуськов М.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" МГУПС (МИИТ). - №158698; заявл. 19.06.15 ; опубл. 20.01.16.

6. Пат. 181227 Российская Федерация, МПК 51 В 22 F 3/16 В 22 F 5/10 F 16 D 13/60 С 22 С 33/02. Диск фрикционной муфты стрелочного привода типа СП / Фадеев В.С. ; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». - № 181227; заявл. 02.03.18 ; опубл. 06.07.2018, Бюл. № 19. – 3 с. : ил.
7. Пат. 176377 Российская Федерация, МПК 51 В 22 F 5/00 F 16 D 13/60 F 16 D 69/02 В 22 F 3/26 С 22 С 33/02. Фрикционный элемент для фрикционной муфты стрелочного электропривода / Фадеев В.С. ; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». - № 181227; заявл. 05.07.16 ; опубл. 17.01.2018, Бюл. № 2. – 3 с. : ил.
8. Ким В.А., Фадеев В.С., Афанасьева А.А. Исследование состава, структуры и свойств нового композиционного фрикционного материала. – Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. – 151-156 с.
9. Бернацкий В.В., Макаренко Н.Н. Современные фрикционные материалы и их применение в тормозных системах автотранспортных средств / Журнал автомобильных инженеров. 2019. № 4(93). с. 32-37.
10. Нилов А.С., Кулик В.И., Гаршин А.П. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала / Новые огнеупоры. 2015. № 7. с.57-68.
11. Ким В.А., Афанасьева А.А. Особенности структуры и свойств фрикционного композиционного материала // Технологии машиностроения. - 2019. – №11. - С. 5-11.
12. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов // Москва. Машиностроение. – 1978. – 213 С.
13. Макушок Е.М., Механика трения // Минск. Наука и техника. – 1974. – 256 С.
14. S.V. Fedorov. "Structural-energy interpretation of a tribosystem". Journal of Friction and Wear 42, pages117–123 (2021).
15. O.T. Cherney et.st. "Factors affecting the tribotechnical properties of sintered materials". IOP Conference Series Materials Science and Engineering 1111 (1), (2021).
16. Ким, В.А. Исследование состава, структуры и свойств нового композиционного фрикционного материала / В. А. Ким, В. С. Фадеев, А. А. Афанасьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. - №1-4(40). – С. 62-68.
17. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. - М.: Наука. 2001. - 478 с.
18. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров // Монография. Издательство ОМГТУ. – 2013. – 240 С.
19. Пат. 2639427 Российская Федерация, МПК 51 С 22 С 33/02 С 33 С 38/16 В 22 F 3/12 В 22 F 7/00. Материал фрикционный композиционный для фрикционной муфты стрелочного электропривода / Фадеев В.С. ; заявитель и патентообладатель ООО «ИнфоТех». - № 2016126795; заявл. 05.07.16 ; опубл. 21.12.2017, Бюл. № 36. – 3 с. : ил.

References

1. V.M. Kryachek. "Friction composites: Traditions and new solutions (review). I. Powder materials". Powder Metallurgy and Metal Ceramics volume 43, pages581–592 (2004)
2. Kurtze L. "Innovative solutions to reduce the transfer of structure borne noise in couplings". Proceedings of the International Congress on Acoustics, (2019).
3. Zhu J., Chen L., Peng C. "Torque Coordination Control during Mode Transitions for a HybridShip". Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, 28 (2017).
4. Patent 2644200 Russian Federation, IPC V 63 N 1/14 V 63 N 23/34. A propeller with a safety clutch / Gerashchenko E.A. .; applicant and patentee Gerashchenko E.A., Gerashchenko G.A. # 2644200; application 05.06.12; published on 08.02.2018.
5. Patent 158698 Russian Federation, IPC B 61 J 1/10. Self-propelled transborder with an electro-magnetic friction drive / M.N. Guskov; applicant and patentee Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Transport University" MSTU. - No. 158698; statement 06/19/15; published on 20.01.16.
6. Patent 181227 Russian Federation, IPC 51 В 22 F 3/16 В 22 F 5/10 F 16 D 13/60 С 22 С 33/02. Disk of friction clutch of switch drive type SP / Fadeev V.S. ; applicant and patentee ООО InfoTech. - No. 181227; application 03/02/18; published on 06.07.2018, Bul. No. 19. - 3 p. : ill.
7. Patent 176377 Russian Federation, IPC 51 В 22 F 5/00 F 16 D 13/60 F 16 D 69/02 В 22 F 3/26 С 22 С 33/02. Friction element for a friction clutch of an electric switch / Fadeev V.S. ; applicant and patentee ООО InfoTech. - No. 181227; application 05.07.16; published on 17.01.2018, Bul. No. 2. - 3 p. : ill.
8. Kim V.A., Fadeev V.S., Afanasyeva A.A. Study of the composition, structure and properties of a new composite friction material. - Manufacturing technologies of the future: from creation to implementation. Materials of the international scientific and practical conference. 2019. - 151-156 p.
9. Bernatsky V.V., Makarenko N.N. Modern friction materials and their use in braking systems of vehicles / Journal of Automotive Engineers. 2019. No. 4 (93). p. 32-37.
10. Nilov A.S., Kulik V.I., Garshin A.P. Analysis of friction materials and technologies for the manufacture of brake pads for high-load brake systems with ceramic composite discs / New refractories. 2015. No. 7. p.57-68.
11. Kim V.A., Afanasyeva A.A. Features of the structure and properties of a frictional composite material. Engineering technology. - 2019. - No. 11. - p. 5-11.
12. Kashcheev V.N. Processes in the zone of frictional contact of metals // Moscow. Mechanical engineering. - 1978. - 213 p.
13. Makushok EM, Mechanics of friction // Minsk. Science and technology. - 1974. -- 256 p.
14. S.V. Fedorov. "Structural-energy interpretation of a tribosystem". Journal of Friction and Wear 42, pages 117-123 (2021).

15. O.T. Cherney et.st. "Factors affecting the tribotechnical properties of sintered materials". IOP Conference Series Materials Science and Engineering 1111 (1), (2021).
16. Kim, V.A. Study of the composition, structure and properties of a new composite friction material / V. A. Kim, V. S. Fadeev, A. A. Afanasyeva // Scientific notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Science of nature and technology. - 2019. - No. 1-4 (40). - p. 62-68.
17. Goryacheva I.G. Mechanics of frictional interaction. - М.: Science. 2001. -- 478 p.
18. Mashkov Yu.K. Tribo physics of metals and polymers // Monograph. Publishing house OMSTU. - 2013. -- 240 p.
19. Patent 2639427 Russian Federation, IPC 51 C 22 C 33/02 C 33 C 38/16 B 22 F 3/12 B 22 F 7/00. Frictional composite material for the friction clutch of a switch electric drive / Fadeev V.S. ; applicant and patentee ООО InfoTech. - No. 2016126795; application 05.07.16; published on December 21, 2017, Bull. No. 36. - 3 p. : ill.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Викторович Башков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии новых материалов, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +79141840778; e-mail: bashkov_ov@mail.ru

Анна Алексеевна Афанасьева, старший преподаватель кафедры материаловедения и технологии новых материалов, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +79141796098; e-mail: ani.afanasjeva@gmail.com

Oleg V. Bashkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the department of materials science and technology of new materials, Komsomolsk-na-Amure State University, 27, Lenina Street, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation, e-mail: bashkov_ov@mail.ru

Anna A. Afanaseva, senior lecturer of the department of materials science and technology of new materials, Komsomolsk-na-Amure State University, 27, Lenina Street, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation, e-mail: ani.afanasjeva@gmail.com

Поступила в редакцию: 12.10.2021
Принята к публикации: 30.11.2021

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 621.438

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.033>

Управление характеристиками замкнутых газотурбинных установок пропульсивных комплексов подводных судов

В.Т. Матвеев¹, e-mail: mvt3900@mail.ru, **А.В. Дологлонян**¹, e-mail: dologlonyan@mail.ru,
В.А. Очеретяный², e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

¹Институт природно-технических систем, ²Севастопольский государственный университет

Аннотация. Подводная техника особенно нужна при работе и снабжении подводными судами объектов на Арктическом шельфе вдоль Северного морского пути, связанного с преодолением ледовых полей. Среди различных типов энергетических установок для подводной техники перспективны замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ), способные в одноконтурном варианте работать на углеводородных типах топлива. В качестве окислителя можно использовать воздух, который на судах можно хранить в сжатом виде. В этом случае не нужна специальная береговая инфраструктура, ограничивающая дальность плавания подводной техники. За основу базовой схемы ЗГТУ принят газотурбинный двигатель (ГТД) с регенерацией (Р) теплоты, как более экономичный по сравнению с ГТД простого цикла, и схемы которого характерны для микрогазотурбинных двигателей. Также рассмотрены ЗГТУ с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ) и регенерацией теплоты как более экономичные и обладающие удельной мощностью в 1,3...1,5 раза большей, чем в ЗГТУ с Р. Определены характеристики ЗГТУ на переменных режимах, так как подводная техника используется при исследовательских, технологических и транспортных работах при частичных нагрузках и различных видах нагружения. Для улучшения экономичности ЗГТУ на режимах частичного нагружения предложено применить регулируемый сопловой аппарат (РСА) в свободной силовой турбине. На частичных нагрузках посредством РСА можно перераспределить теплоперепад между турбинами, изменить расход газа через турбины, приблизить регулирование к количественному типу. При этом наблюдается увеличение эффективного КПД относительно других способов регулирования при уменьшении мощности двигателя и рост начальной температуры газа, который приближает параметры рабочего цикла двигателя к номинальным значениям.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная установка, пропульсивный комплекс, регенерация теплоты, регулируемый сопловой аппарат, турбокомпрессорный утилизатор.

Control of characteristics of closed gas turbine plants of submarines propulsion complexes

Valeriy T. Matviienko¹, e-mail: mvt3900@mail.ru, **Andrey V. Dologlonyan**¹, e-mail: dologlonyan@mail.ru,
Vladimir A. Ocheretianyi², e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

¹Institute of Nature and Technical Systems, ²Sevastopol State University

Abstract. Underwater equipment is especially needed when operating and supplying objects by submarines on the Arctic shelf along the Northern Sea Route associated with ice fields overcoming. Among the various types of power plants for underwater equipment, closed gas turbine plants (CGTP) are promising, capable of operating in a single-circuit version on hydrocarbon types of fuel. Air can be used as an oxidizing agent, which can be stored compressed on ships. In this case, there is no need for a special coastal infrastructure that limits the range of navigation of underwater equipment. A gas turbine engine (GTE) with heat regeneration (R) is adopted as the basis for the basic scheme of CGTP, as it is more economical in comparison with a simple cycle GTE, and the schemes of which are typical for microgas turbine engines. Also considered are CGTP with a turbocompressor utilizer (TCU) and heat regeneration as more economical and having a specific power 1.3...1.5 times higher than in CGTP with R. The characteristics of CGTP in variable modes are determined, since underwater equipment is used in research, technological and transport works at partial modes and various types of loading. To improve the efficiency of CGTP in partial loading modes, it is proposed to use a variable area nozzle (VAN) in a free power turbine. At partial loads, by means of VAN, it is possible to redistribute the heat drop between the turbines, change the gas flow rate through the turbines, and bring the regulation closer to the quantitative type. At the same time, there is an increase in the effective efficiency relative to other control methods with a decrease in engine power and an increase in the initial gas temperature, which brings the parameters of the engine operating cycle closer to the nominal values.

Keywords: closed gas turbine plant, propulsion complex, heat regeneration, variable area nozzle, turbocompressor utilizer.

Введение

При освоении природных богатств морей и океанов существенная роль отводится подводной технике, которая используется для разведки и разработки месторождений полезных ископаемых и дальнейшей их эксплуатации. Особенно подводная техника нужна при работе на Арктическом шельфе и

снабжении подводными судами объектов вдоль Северного морского пути, связанного с преодолением ледовых полей.

В таких условиях подводная техника должна обладать как достаточной мощностью, так и эксплуатационной гибкостью, возможностью длительное время работать в отрыве от инфраструктуры мест базирования.

Среди различных типов энергоустановок для этих целей перспективны замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ), обладающие большой удельной мощностью, способные в одноконтурном варианте с разным усложнением рабочего цикла двигателя работать на углеводородных типах топлива [1,2]. Окислителем традиционно применяется кислород, для получения которого в жидком или газообразном виде и снабжения подводного аппарата нужна специальная береговая инфраструктура, ограничивающая радиус действия подводной техники.

В качестве окислителя предлагается использовать воздух [3,4], который на подводных аппаратах и судах можно хранить в сжатом виде в баллонах или специальных емкостях, и пополнять в надводном положении в процессе плавания.

Подводная техника используется при проведении исследовательских и технологических работ, транспортировке грузов и т.п., поэтому энергоустановка эксплуатируется при различных нагрузках и видах нагружения. Следовательно, необходимо определить рациональные схемные решения и режимы работы ЗГТУ на переменных режимах работы, на которых обычно падает эффективный КПД.

Задачей разработки является нахождение способов и исследование возможностей повышения эффективного КПД на частичных режимах нагружения ЗГТУ в составе судового пропульсивного комплекса.

Пропульсивные установки подводных судов

Пропульсивные установки судов по своему составу различаются многообразием схемных решений, различными двигателями и способами передачи энергии на движители.

Для пропульсивной установки подводного судна рассматриваем замкнутые газотурбинные двигатели с механической передачей от двигателя к движителю (гребному винту). Для турбинного двигателя характерно применение редуктора, и далее, валопровода для привода гребного винта.

На рис. 1 изображена пропульсивная установка (ПУ) подводного судна, где в установке применен замкнутый газотурбинный двигатель с регенерацией теплоты, который рекомендуется в качестве базового для подводной энергоустановки.

На рис. 2 изображена ПУ подводного судна с замкнутым газотурбинным двигателем, соединенным с турбокомпрессорным утилизатором, в состав которого входит турбина перерасширения, дожимающий компрессор и между ними регенератор и охладитель газа.

В ЗГТУ в схемах рис. 1 и 2 регенератор повышает КПД двигателей за счет предварительного подогрева рабочего тела перед камерой сгорания и одновременно служит охладителем газа (предварительным) в замкнутом контуре. Перерасширение газа увеличивает мощность ЗГТУ, при этом КПД растет относительно на 10...15 %, а удельная мощность в 1,3...1,5 раза по сравнению с ЗГТУ с регенерацией теплоты [5, 6].

В схемах на рис.1 и 2 применяются свободные силовые турбины, которые позволяют установкам работать на всех режимах нагружения с обеспечением устойчивой работы всех элементов

двигательной установки и применять винт фиксированного шага.

В качестве окислителя в ЗГТУ применен воздух, который на подводном судне хранится в сжатом виде в баллонах и пополняется в надводном положении в процессе плавания. Воздух-окислитель подается непосредственно в жаровую трубу камеры сгорания в количестве, необходимом для горения углеводородного топлива.

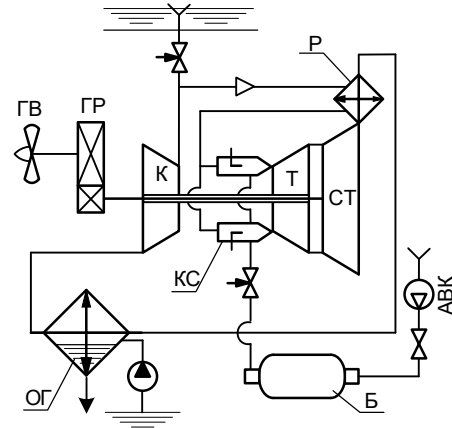


Рис. 1. Схема пропульсивной установки с ЗГТУ и регенерацией теплоты:

К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ – охладитель газов; Р – регенератор; СТ – силовая турбина; АВК – автономный воздушный компрессор; Б – баллоны сжатого воздуха; ГР – главный редуктор; ГВ – гребной винт

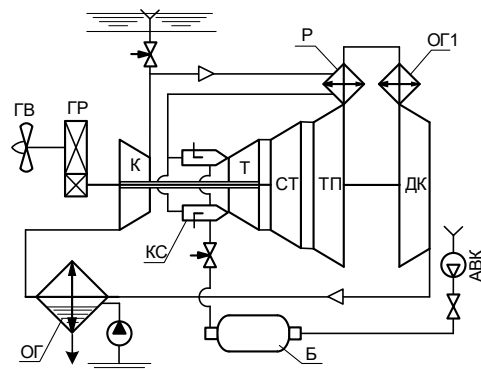


Рис. 2. Схема пропульсивной установки с ЗГТУ и ТКУ с регенерацией теплоты:

ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения такие же, как и на рис. 1.

Таким образом, рабочим телом в турбине является смесь азота и продуктов сгорания топлива [4]. Азот, который присутствует в воздухе-окислителе является дополнительным рабочим телом, который выполнив полезную работу, удаляется с излишними продуктами сгорания за борт.

Гибкие характеристики ЗГТУ на переменных режимах

Главный двигатель в судовом пропульсивном комплексе является всережимным, часто длительно работающим на частичных нагрузках. Поэтому повысить экономичность ЗГТУ на переменных режимах является необходимым условием.

Задача решается за счет выбора рабочего цикла в двигателе, схемного решения установки и изменения конструктивных элементов двигателя на характерных винтовых нагрузках. Ранее было установлено [7,8], что на переменном режиме более высокой энергоэффективностью обладают ЗГТУ со свободной силовой турбиной, регенерацией теплоты и, далее, с турбокомпрессорным утилизатором (рис. 1 и 2).

На рис. 3 и 4 показаны зависимости характеристик ЗГТУ с регенерацией теплоты (схема 1СН/Р) и ЗГТУ с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты (схема 1СН/Р+ТП) от относительной эффективной мощности \bar{N}_e .

Общее положительное свойство замкнутых ГТД с Р и ГТД с Р и ТП то, что на частичных нагрузках в широком диапазоне нагружения эффективный КПД (η_e) более высокий, чем в замкнутом ГТД простого цикла (схема 2 СН). На номинальной нагрузке теплотехнические (общие) КПД ($\eta_{тп}$) для рассматриваемых схем примерно равны, однако в зависимости от \bar{N}_e имеют свои закономерности изменения.

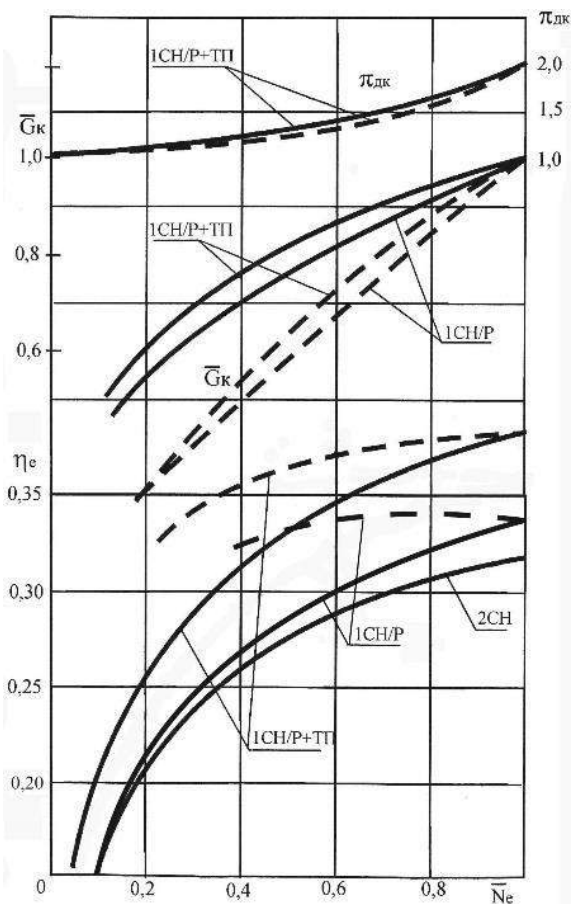


Рис. 3. Характеристик циклов ЗГТУ на частичных винтовых нагрузках при $T_3=1373$ К, $\pi_k=5-6$, $\pi_{дж}=2,0$ и $\sigma=0,8$

Изменение характеристик ЗГТУ на частичных нагрузках можно осуществить за счет управления рабочим процессом в ГТД.

Изменить эффективный КПД в ЗГТУ при переменном режиме работы возможно посредством применения регулируемого соплового аппарата

(РСА) в свободной силовой турбине.

Расчет характеристик ЗГТУ с регенерацией теплоты и турбиной перерасширения производился по методике, предложенной в работах [9,10], с учетом применения РСА в силовой турбине.

В общем случае при расчете характеристик ГТД на частичных нагрузках применяется параметр расхода, определяемый по формуле:

$$A = \bar{G}_k (T_3 / T_{03})^{0.5c}, \quad (1)$$

где \bar{G}_k – относительный расход рабочего тела; T_3 и T_{03} – начальные температуры газа в двигателе (текущее значение и номинальное).

Для свободной силовой турбины с РСА формулу (1) можно записать в виде:

$$A_{см} = \bar{G}_k (T_3 / T_{03})^{0.5c}, \quad (2)$$

то есть изменения характеристик силовой турбины будет производиться в зависимости от изменения отношения начальных температур газа в ГТД, характеризующего работы двигателя на частичных нагрузках, а также параметра c , который характеризует раскрытие проточной части РСА.

Параметр c принимается таким образом, чтобы текущая начальная температура (T_3) не превышала номинального значения (T_{03}).

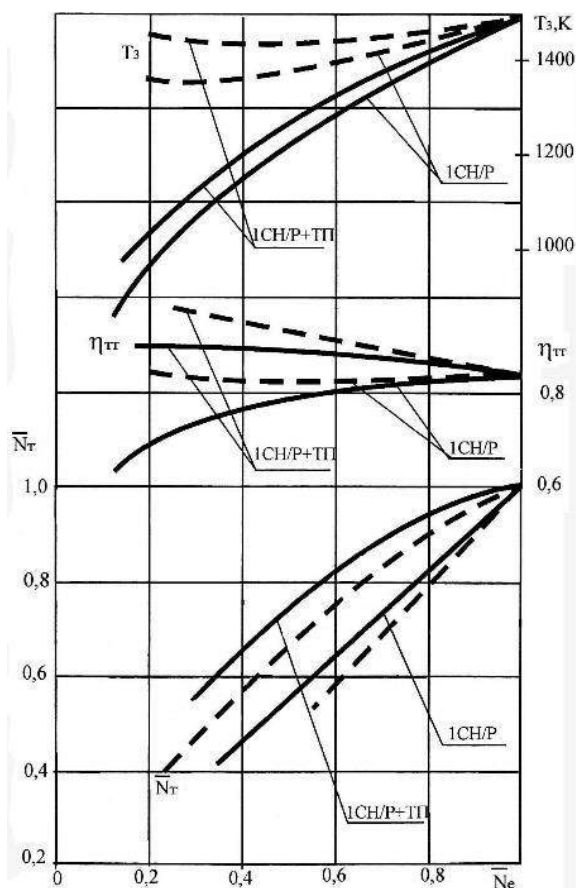


Рис. 4. Теплотехнические характеристики ЗГТУ на частичных винтовых нагрузках при $T_3=1373$ К, $\pi_k=5-6$, $\pi_{дж}=2,0$ и $\sigma=0,8$

На частичных нагрузках посредством РСА можем перераспределить теплоперепад между турбинами, изменить расход газа через турбины, приблизить регулирование к количественному типу.

На частичных нагрузках прикрыв РСА силовой

турбины уменьшаем расход рабочего тела через двигатель, что для \bar{G}_K на рис. 3 показано прерывистыми линиями.

При этом наблюдается увеличение эффективного КПД (η_e) при уменьшении \bar{N}_e (прерывистые линии на рис.3) как для ЗГТУ с Р и ТП, так и для ЗГТУ с Р.

Объясняется это тем, что начальная температура газа T_3 в двигателе на частичных нагрузках мало отличается от ее значения на номинальном режиме и параметры рабочего цикла приближаются к оптимальным значениям при номинальном нагружении ЗГТУ (рис. 3 и 4).

Что касается теплотехнических характеристик, теплотехнический КПД ($\eta_{тп}$) обеих схем ЗГТУ на частичных нагрузках несколько растет, при этом относительная тепловая мощность \bar{N}_r уменьшается за счет перераспределения потоков энергии в пользу

механической.

Заключение

1. В качестве главной установки в пропульсивном комплексе подводных судов целесообразно применять ЗГТУ с регенерацией теплоты, которые экономичны по сравнению с ЗГТУ простого цикла.

2. Применение в силовой турбине ЗГТУ регулируемого соплового аппарата позволяет повысить эффективный КПД на частичных режимах нагружения.

3. Конструктивно предложенная ЗГТУ выполнена в одноконтурном исполнении, в которой применяется углеводородное топливо и окислитель – воздух, что исключает необходимость иметь специальную инфраструктуру берегового базирования.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00469

Литература

1. Чернышев Е.А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е.А. Чернышев, Е.А. Романова, А.Д. Романов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. – № 5(33). – С. 140-152.
2. Замуков В.В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В.В. Замуков, Д.В. Сидоренков // Судостроение, 2012. № 4. – С. 29-33.
3. Пат. 188226 МПК F02C 1/10. Замкнутая газотурбинная воздухонезависимая установка для подводной несущей платформы / В.Т. Матвеевко, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный; заявл. и патентообл. ФГБНУ «Институт природно-технических систем». – № 2018131778; заявл. 03.09.2018; опубл. 03.04.2019, Бюл. № 10.
4. Матвеевко В.Т. Параметры рабочего тела замкнутых микрогазотурбинных установок с окислителем воздухом / В.Т. Матвеевко, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный, // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ГОУ им. И.С. Тургенева, 2019. – № 5(337). – С. 82-88.
5. Матвеевко В.Т. Замкнутые газотурбинные установки для пропульсивных комплексов подводной техники / В.Т. Матвеевко, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный, // Морские интеллектуальные технологии. – С.-Петербург. НИЦ МИТ, 2019. – № 3(45). – Т.3. – С. 77-83.
6. Matviienko V., Andriets O., Ocheretianyi V. Gas-turbine plant with overexpansion turbine and heat regeneration in the ship propulsion complex [Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf], Denmark, Germany.
7. Матвеевко В.Т. Переменные режимы работы замкнутых газотурбинных установок в пропульсивных комплексах подводной техники / В.Т. Матвеевко, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный, // Морские интеллектуальные технологии. – С.-Петербург. НИЦ МИТ, 2020. – № 3(49). – Т.1. – С. 77-83.
8. Матвеевко В.Т. Эксплуатация на переменных режимах замкнутых микрогазотурбинных установок с окислителем кислородом для подводной техники / В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяный, А.В. Дологлонян // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2020. – Вып. № 4. – С. 757-763.
9. Матвеевко В.Т. Эффективность работы газотурбинного двигателя с регенерацией теплоты на частичных винтовых нагрузках / В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяный // Вестник СевНТУ, Сб.науч.трудов. – Севастополь, 2011. – Вып. № 119 – С. 118-121.
10. Матвеевко В.Т. Гибкие когенерационные технологии на базе энергетических газотурбинных технологий. 65 НТС по проблемам газовых турбин и парогазовых установок / В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяный, А.В. Дологлонян // Сб. докладов. – С.-Петербург. – 18-19 сентября 2018 г. – ОАО ВТИ. 2018. – С. 93-101.

References

1. Chernyshev E.A. Razvitie vozdukhonezavisimyykh energeticheskikh ustanovok podvodnykh lodok [Development of air-independent power plants for submarines]. E.A. Chernyshev, E.A. Romanova, A.D. Romanov. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova, 2015, № 5(33), S. 140-152.
2. Zamukov V.V. Vybory vozdukhonezavisimoy energoustanovki neatomnykh podvodnykh lodok [Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines]. V.V. Zamukov, D.V. Sidorenkov. Sudostroenie. 2012, № 4, S. 29-33.
3. Pat. 188226 MPK F02C 1/10. Zamknutaya gazoturbinnaya vozdukhonezavisimaya ustanovka dlya podvodnoy nesushchej platformy [Closed gas turbine air-independent plant for an underwater carrier platform] / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj; zayavl. i patentoobl. FGBNU «Institut prirodno-tekhnicheskikh sistem». – № 2018131778; zayavl. 03.09.2018; opubl. 03.04.2019, Byul. № 10.
4. Matveenko V.T. Parametry rabocheho tela zamknutykh mikrogazoturbinykh ustanovok s oksilitelem vozduhom [Working fluid parameters of closed micro-gas turbine plants with air oxidizer] / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan,

- V.A. Ocheretyanyj, // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: GOU im. I.S. Turgeneva, 2019. – № 5(337). – S. 82-88.
5. Matveenko V.T. Zamknutyje gazoturbinye ustanovki dlya propul'sivnyh kompleksov podvodnoj tekhniki [Closed gas turbine plants for propulsion complexes of underwater equipment] / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj, // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – S.-Peterburg. NIC MIT, 2019. – № 3(45). – Т.3. – S. 77-83.
 6. Matviienko V., Andriets O., Ocheretianyi V. Gas-turbine plant with overexpansion turbine and heat regeneration in the ship propulsion complex [Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf], Denmark, Germany.
 7. Matveenko V.T. Peremennye rezhimy raboty zamknytyh gazoturbinyh ustanovok v propul'sivnyh kompleksah podvodnoj tekhniki [Variable operating modes of closed gas turbine plants in propulsion complexes of underwater equipment] / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj, // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – S.-Peterburg. NIC MIT, 2020. – № 3(49). – Т.1. – S. 77-83.
 8. Matveenko V.T. Ekspluatatsiya na peremennyh rezhimakh zamknytyh mikrogazoturbinyh ustanovok s okislitelem kislorodom dlya podvodnoj tekhniki [Operation in variable modes of closed micro-gas turbine plants with an oxygen oxidizer for underwater equipment] / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj, A.V. Dologlonyan // Vestnik GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2020. – Vyp. № 4. – S. 757-763.
 9. Matveenko V.T. Effektivnost' raboty gazoturbinnogo dvigatelya s regeneraciej teploty na chastichnyh vintovyh nagruzkah [Efficiency of a gas turbine engine with heat regeneration at partial screw loads] / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj // Vestnik SevNTU, Sb.nauch.trudov. – Sevastopol', 2011. – Vyp. № 119 – S. 118-121.
 10. Matveenko V.T. Gibkie kogeneracionnye tekhnologii na baze energeticheskikh gazoturbinyh tekhnologij [Flexible cogeneration technologies based on energy gas turbine technologies]. 65 NTS po problemam gazovyh turbin i parogazovyh ustanovok / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj, A.V. Dologlonyan // Sb. dokladov. – S.-Peterburg. – 18-19 sentyabrya 2018 g. – OAO VTI. 2018. – S. 93-101.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Тимофеевич Матвеенко, доктор технических наук, профессор Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: mvt3900@mail.ru

Андрей Вартазарович Дологлонян, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Ленина, 28, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Владимир Анатольевич Очеретяный, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Энергоустановок морских судов и сооружений, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, Университетская, 33, e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Valeriy T. Matviienko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, e-mail: mvt3900@mail.ru

Andrey V. Dologlonyan, Ph.D. (Eng), assistant professor, Senior Researcher, chief of laboratory, Institute of Nature and Technical Systems, Lenina St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: dologlonyan@mail.ru

Vladimir A. Ocheretianyi, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Power Plants of Marine Ships and Structures, Sevastopol State University, Universitetskaya, St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Поступила в редакцию: 10.09 2021

Принята к публикации: 24.10.2021

УДК 621.3.01(076)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.034>

Проверка адекватности полиномиальных зависимостей однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики

А.Б. Каракаев¹, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru, А.В. Костенко¹, e-mail: san9110@mail.ru
¹Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О.Макарова

Аннотация Статья посвящена сравнению результатов расчётов полиномиальных зависимостей однофазного асинхронного двигателя, полученных с использованием методов планирования эксперимента, с математической моделью построенной с помощью программ на ЭВМ на языке программирования Python. Актуальность работы заключается в том, что задачи аппроксимационного типа не всегда возможно решить, используя ЭВМ, поэтому исследователи часто применяют методы планирования экспериментов для решения таких задач и после уже ставят математическую модель на ЭВМ и проверяют адекватность полученных результатов. В результате в статье авторами предоставляется план проверки адекватности полиномиальных зависимостей однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики. По итогу выполненной работы авторы приходят к выводу об адекватности построенной математической модели на ЭВМ с использованием языка программирования Python.

Ключевые слова: Методы планирования эксперимента, полиномиальная модель, однофазный асинхронный электродвигатель, система судовой автоматики, язык программирования, аппроксимационные задачи, внешние фазосдвигающие устройства, математическая модель.

Checking the adequacy of polynomial dependencies of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems

Aleksandr B. Karakaev¹, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru, Aleksandr V. Kostenko¹, e-mail: san9110@mail.ru
¹Admiral Makarov State university of marine and inland shipping, Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the comparison of the results of calculations of polynomial dependencies of a single-phase asynchronous motor, obtained using methods of experiment planning, with a mathematical model built using computer programs in the Python programming language.

The relevance of the work lies in the fact that problems of the approximation type are not always possible to solve using a computer, therefore, researchers often use methods of planning experiments to solve such problems and after that they already have a mathematical model on a computer and check the adequacy of the results obtained. As a result, the authors provide a plan for checking the adequacy of the polynomial dependencies of a single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems.

As a result of the work performed, the authors come to the conclusion about the adequacy of the constructed mathematical model on a computer using the Python programming language.

Key words: Methods of experiment planning, polynomial model, single-phase asynchronous electric motor, ship automation system, programming language, approximation problems, external phase-shifting devices, mathematical model.

Введение

На сегодняшний день в мире наблюдается тенденция к автоматизации и упрощению различных процессов, расчет параметров и построение моделей однофазных асинхронных электродвигателей (ОАД) без внешних фазосдвигающих устройств (ВФСУ) для систем судовой автоматики не стал исключением и успешно реализуется с помощью ряда программ на ЭВМ. Однако, задачи аппроксимационного типа не всегда возможно решить, используя ЭВМ, поэтому исследователи часто применяют методы планирования экспериментов для решения таких задач [1].

Данный метод позволяет заменить сложное математическое описание процесса преобразования энергии в электрических машинах простым полиномом с явной связью между переменными параметрами и показателями машин [2]. В данной статье исследуется адекватность полученных полиномиальных моделей, описанных в предыдущей статье, опубликованной авторами [3].

1. Метод проверки адекватности полиномиальных зависимостей

Сегодня исследователю доступен довольно большой набор инструментов для построения математических моделей однофазных асинхронных электродвигателей для систем судовой автоматики, например, методы планирования эксперимента, которые позволяют сложное математическое описание аппроксимировать достаточно простой полиномиальной моделью, способной решать ряд аналитических и оптимизационных задач [4].

Однако, в современном мире гораздо удобнее для решения таких задач использовать программы и современные языки программирования для ЭВМ, например: Python, C++, Java и прочие [5].

Их использование даёт возможность быстро решать необходимые задачи и получать довольно точные результаты. Но, как было замечено ранее, задачи аппроксимационного типа, где у исследователя не всегда есть все значения переменных величин, решать с помощью ЭВМ затруднительно [6].

Получить сразу адекватную модель очень сложно, поэтому и прибегают к решению такого типа

задач с помощью полиномов, а уже получив полиномиальные зависимости решают данные задачи с применением ЭВМ. После проводят проверку адекватности полученных математических моделей, анализируя результаты полученные с помощью решения полиномиальных зависимостей и решения с использованием современных языков программирования на ЭВМ [7].

В связи с тем, что дисперсия воспроизводимости опытов S_3^2 , формальное применение статистического аппарата для проверки адекватности полиномов невозможно. В этом случае вывод о допустимости применения полиномиальной модели можно сделать на основании анализа величины дисперсии адекватности и отклонения $(y_a^3 - y_a^p)$ [8]. Аппроксимация считается адекватной, если ее погрешность Δy в точках плана и в ряде контрольных точек не превосходит $\Delta y_{доп}$.

Учитывая априорную информацию [9], опыт экспериментального определения характеристик электродвигателей, а также сообразуясь с задачами, которые предполагается решать с помощью полиномов, принято допустимое отклонение функций цели $\Delta y_{доп}=5\%$.

Результаты расчетов с помощью полиномиальных моделей уже были представлены авторами в предыдущей статье [3].

Для примера, используя язык программирования Python на ЭВМ, решение уравнения для кратности пускового момента записывается следующим образом:

```
array_out[39] = ((array_out[7] * array_out[29]) -
(array_out[11] * array_out[30])) + ((array_out[20] * (1
array_out[31]) + (array_out[19] * array_out[31])) +
array_out[35] # kп
```

```
print("kп = ", array_out[39].real, " – кратность (2)
пускового момента")
```

$$k_{п} = 377.0 \quad (3)$$

Полученные значения расчетов на ЭВМ и полученные по полиномиальным зависимостям таких параметров как кратность пускового момента, кратность максимального момента, КПД и коэффициент мощности сводятся в таблицы и сравниваются для того, чтобы по результатам такого сравнения сделать вывод об адекватности или неадекватности полученной математической модели однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматике.

Таблица 1

Результаты сравнения расчета на ЭВМ и вычислений по полиномиальным зависимостям для кратности пускового момента, $k_{п} \times 10^3$

№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %	№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %
1	377	373	1,060	32	555	558	0,541
2	745	748	0,403	33	267	254	0,864
3	229	227	0,881	34	201	213	5,970
4	558	557	0,174	35	574	562	2,436
5	228	233	2,190	36	488	498	2,049
6	558	563	0,896	37	285	275	3,504
7	173	172	0,581	38	222	238	6,250
8	450	457	1,560	39	651	637	2,151
9	354	359	1,410	40	564	577	1,406
10	464	464	0	41	387	387	0
11	237	237	0	42	579	564	2,591
12	356	356	0	43	321	340	5,919
13	406	409	0,739	44	481	489	1,663
14	520	523	0,577	45	301	290	3,654
15	276	278	0,725	46	409	388	5,130
16	407	405	0,491	47	251	264	5,179
17	528	533	0,947	48	336	334	0,595
18	358	354	1,117	49	570	572	0,351
19	356	364	2,198	50	369	369	0
20	271	269	0,738	51	570	572	0,351

21	585	586	0,171	52	369	369	0
22	405	405	0	53	449	447	0,445
23	406	411	1,217	54	257	260	1,167
24	312	313	0,321	55	449	447	0,671
25	234	244	4,270	56	257	253	1,556
26	315	328	4,127	57	377	377	0
27	148	140	5,405	58	377	377	0
28	234	220	5,983	59	377	377	0
29	555	567	2,162	60	377	377	0
30	690	715	3,620	61	377	377	0
31	394	379	3,810	62	377	377	0

Среднее отклонение в %: 1,753

Таблица 2

Результаты сравнения расчета на ЭВМ и вычислений по полиномиальным зависимостям для кратности максимального момента, $k_M \times 10^2$

№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %	№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %
1	120	118,0	1,667	32	117	115,0	1,709
2	115	115,0	0	33	125	122,0	2,400
3	112	113,0	0,893	34	113	113,2	0,172
4	118	115,0	2,542	35	123	125,0	1,626
5	112	113,0	0,893	36	114	115,2	1,053
6	118	115,0	2,542	37	121	119,0	1,653
7	114	114,0	0	38	112	113,1	0,982
8	116	116,0	0	39	121	120,0	0,826
9	116	115,2	0,690	40	115	117,0	1,739
10	118	117,0	0,847	41	121	119,2	1,482
11	114	113,3	0,614	42	123	122,0	0,813
12	116	115,0	0,862	43	113	114,0	0,877
13	116	114,1	1,637	44	115	115,4	0,348
14	117	115,5	1,282	45	119	117,7	1,092
15	114	113,0	0,877	46	122	121,1	0,738
16	117	155,5	1,282	47	112	112,5	0,446
17	118	118,0	0	48	113	113,9	0,796
18	117	114,0	2,564	49	124	123,4	0,484
19	116	116,4	0,345	50	113	113,2	0,172
20	115	113,0	1,739	51	124	123,6	0,323
21	118	117,9	0,085	52	113	112,7	0,265
22	116	113,0	2,586	53	122	121,4	0,492
23	116	116,4	0,345	54	112	112,3	0,268
24	115	115,0	0	55	122	122,1	0,082

25	115	116,0	0,869	56	112	111,7	0,268
26	117	118,0	0,855	57	116	116	0
27	114	112,1	1,667	58	116	116	0
28	115	113,5	1,304	59	116	116	0
29	117	117,6	0,513	60	116	116	0
30	119	120,0	0,840	61	116	116	0
31	115	113,1	1,652	62	116	116	0

Среднее отклонение в %: 0,857

Таблица 3

Результаты сравнения расчета на ЭВМ и вычислений по полиномиальным зависимостям для коэффициента полезного действия, η

№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %	№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %
1	0,1221	0,1284	5,159	32	0,1028	0,0980	4,669
2	0,0972	0,1009	3,806	33	0,1967	0,1873	4,779
3	0,1418	0,1461	3,032	34	0,1364	0,1431	4,912
4	0,1038	0,1071	3,179	35	0,1465	0,1389	5,188
5	0,1418	0,1451	2,327	36	0,1028	0,1102	7,685
6	0,1038	0,1061	2,216	37	0,1514	0,1433	5,350
7	0,1462	0,1493	2,120	38	0,1042	0,1019	2,207
8	0,0984	0,0983	0,305	39	0,1046	0,0977	6,597
9	0,1332	0,1325	0,526	40	0,0731	0,0744	0,958
10	0,1349	0,1335	1,038	41	0,1417	0,1358	4,173
11	0,1350	0,1359	0,667	42	0,1396	0,1356	3,004
12	0,1418	0,1417	0,071	43	0,0981	0,0970	1,121
13	0,0982	0,0975	0,713	44	0,0981	0,0996	1,529
14	0,1012	0,1035	2,270	45	0,1470	0,1427	2,925
15	0,0972	0,0977	0,514	46	0,1493	0,1458	2,344
16	0,1034	0,1034	0	47	0,0977	0,0972	0,512
17	0,1294	0,1418	9,583	48	0,1039	0,1050	1,059
18	0,1353	0,1304	3,976	49	0,1424	0,1418	0,021
19	0,1428	0,1438	0,700	50	0,0985	0,0978	0,711
20	0,1369	0,1328	2,995	51	0,1424	0,1450	1,826
21	0,0982	0,0914	6,925	52	0,0985	0,0946	3,959
22	0,0997	0,0950	4,714	53	0,1496	0,1494	0,134
23	0,1050	0,1068	1,713	54	0,0989	0,1020	3,134
24	0,0992	0,0934	5,847	55	0,1496	0,1496	0
25	0,1418	0,1482	4,513	56	0,0989	0,0988	0,101
26	0,1378	0,1438	4,354	57	0,1201	0,1201	0
27	0,1400	0,1322	5,571	58	0,1201	0,1201	0
28	0,1418	0,1386	3,581	59	0,1201	0,1201	0

29	0,1028	0,1092	6,226	60	0,1201	0,1201	0
30	0,1074	0,1144	6,518	61	0,1201	0,1201	0
31	0,0901	0,0836	7,214	62	0,1201	0,1201	0

Среднее отклонение в %: 2,391

Таблица 4

Результаты сравнения расчета на ЭВМ и вычислений по полиномиальным зависимостям для коэффициента мощности, $\cos\varphi$

№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %	№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %
1	0,947	0,944	0,285	32	0,914	0,910	0,394
2	0,942	0,937	0,582	33	0,879	0,879	0
3	0,928	0,924	0,483	34	0,934	0,930	0,430
4	0,915	0,913	0,245	35	0,865	0,866	0,150
5	0,927	0,924	0,324	36	0,926	0,922	0,464
6	0,915	0,915	0	37	0,905	0,904	0,111
7	0,913	0,912	0,088	38	0,950	0,943	0,695
8	0,903	0,900	0,266	39	0,893	0,893	0
9	0,912	0,900	0,329	40	0,942	0,936	0,620
10	0,925	0,923	0,259	41	0,885	0,887	0,215
11	0,896	0,892	0,446	42	0,913	0,911	0,263
12	0,907	0,904	0,353	43	0,938	0,934	0,448
13	0,920	0,928	0,215	44	0,952	0,948	0,420
14	0,940	0,939	0,096	45	0,873	0,872	0,149
15	0,918	0,915	0,370	46	0,882	0,881	0,136
16	0,926	0,924	0,238	47	0,932	0,929	0,322
17	0,934	0,930	0,428	48	0,936	0,929	0,755
18	0,910	0,911	0,109	49	0,909	0,906	0,286
19	0,906	0,908	0,177	50	0,889	0,889	0
20	0,898	0,895	0,356	51	0,943	0,949	0,663
21	0,947	0,945	0,222	52	0,932	0,940	0,826
22	0,929	0,927	0,258	53	0,909	0,895	0,702
23	0,926	0,924	0,194	54	0,889	0,880	0,990
24	0,920	0,919	0,130	55	0,943	0,938	0,509
25	0,924	0,922	0,137	56	0,932	0,929	0,290
26	0,937	0,936	0,107	57	0,919	0,919	0
27	0,914	0,910	0,492	58	0,919	0,919	0
28	0,924	0,921	0,357	59	0,919	0,919	0
29	0,914	0,912	0,208	60	0,919	0,919	0
30	0,925	0,924	0,076	61	0,919	0,919	0
31	0,905	0,900	0,541	62	0,919	0,919	0

Среднее отклонение в %: 0,288

Таблица 5

Результаты сравнения расчета на ЭВМ и вычислений по полиномиальным зависимостям для скольжения соответствующему максимальному моменту, S_m

№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %	№ Опыта	Расчет на ЭВМ	Расчет по полиному	Отклонение в %
1	0,377	0,379	0,531	32	0,450	0,448	0,373
2	0,500	0,506	1,200	33	0,350	0,346	1,186
3	0,317	0,324	2,278	34	0,200	0,223	1,125
4	0,450	0,459	2,056	35	0,460	0,481	4,515
5	0,317	0,324	2,278	36	0,410	0,407	0,627
6	0,450	0,458	1,778	37	0,370	0,392	5,862
7	0,310	0,319	3,035	38	0,320	0,323	1,047
8	0,440	0,458	4,057	39	0,500	0,472	5,578
9	0,370	0,385	3,946	40	0,460	0,458	0,376
10	0,390	0,400	2,585	41	0,420	0,420	0
11	0,360	0,358	0,556	42	0,450	0,450	0
12	0,350	0,359	2,474	43	0,370	0,362	2,073
13	0,410	0,420	2,546	44	0,390	0,378	3,126
14	0,420	0,441	4,981	45	0,410	0,410	0
15	0,400	0,409	2,255	46	0,420	0,428	1,921
16	0,410	0,415	1,098	47	0,360	0,348	3,333
17	0,409	0,407	0,582	48	0,350	0,337	3,603
18	0,370	0,367	0,757	49	0,480	0,487	1,479
19	0,370	0,371	0,286	50	0,470	0,437	4,048
20	0,360	0,357	0,939	51	0,370	0,394	6,476
21	0,440	0,452	2,727	52	0,360	0,374	4,033
22	0,410	0,418	1,900	53	0,440	0,441	0,200
23	0,400	0,412	2,975	54	0,400	0,411	2,143
24	0,400	0,405	1,240	55	0,370	0,368	0,665
25	0,320	0,327	2,250	56	0,360	0,368	2,252
26	0,340	0,343	0,788	57	0,390	0,390	0
27	0,320	0,313	2,263	58	0,390	0,390	0
28	0,320	0,313	2,263	59	0,390	0,390	0
29	0,450	0,462	2,693	60	0,390	0,390	0
30	0,470	0,483	2,734	61	0,390	0,390	0
31	0,440	0,443	0,609	62	0,390	0,390	0

Среднее отклонение в %: 2,078

2. Результаты проверки адекватности полиномиальной модели ОАД

В результате сравнений расчетов на ЭВМ [6] и вычислений по полиномиальным зависимостям для всех функций цели получены значения средних

отклонений ($y_a^3 - y_a^p$) и дисперсий адекватности S_a^2 , которые приведены в таблице 6 и позволяют сделать вывод об адекватности построенной математической модели однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматки методами планирования эксперимента [10,11].

Таблица 6

Значения отклонения Δu и дисперсии адекватности

№ п/п	Функции цели	Расхождения %	Дисперсия адекватности
1	k_n	1,753	$1,620 * 10^{-4}$
2	k_M	0,875	$3,201 * 10^{-4}$
3	η	2,391	$4,136 * 10^{-5}$
4	$\cos\varphi$	0,288	$2,614 * 10^{-5}$
5	S_m	2,078	$2,395 * 10^{-4}$

Заключение

Как видно из таблиц 1÷6 – среднее отклонение расчетов на ЭВМ и по полиномиальным моделям колеблется от 0,288% до 2,391% и ниже принятого допустимого отклонения $\Delta u_{\text{доп}}=5\%$.

В отдельных точках плана расхождение не выходит за рамки 10%. [12] Все вышеизложенное

позволяет сделать вывод о том, что полученная полиномиальная модель ОАД без ВФСУ с достаточной точностью для исследования степени точности аппроксимирует громоздкие математические выражения, описывающие электромагнитные процессы в рассчитываемом двигателе.

Литература

1. Каракаев А.Б., Костенко А. В. Разработка математической модели однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматки методами планирования эксперимента - Эксплуатация морского транспорта.- 2020.- № 1(94).- С.154-165.
2. Каракаев А. Б. Разработка и применение однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматки / А. Б. Каракаев, А.В. Костенко // Сборник тезисов национальной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». — СПб.: Издательство ГУМРФ им. С.О. Макарова, 2018. — С. 91-92.
3. Каракаев А.Б., Костенко А. В. Выявление зависимостей необходимых для построения полиномиальных моделей однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматки методом планирования эксперимента - Эксплуатация морского транспорта.- 2020.- № 2(95).- С.76-82.
4. Копылов Н.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах – М.:Высшая школа, 1980-256с.
5. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях -М.:Финансы и статистика, 1981-263с.
6. Ивоботенко Б.Л., Ильинский Н.Ф., Копылов Н.П. Планирование эксперимента в электромеханике - М.:Энергия, 1975 – 184с.
7. Асатурян В.Н. Теория планирования эксперимента -М.:Радио и связь, 1983 – 248с.
8. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий – М.:Наука, 1976 – 285с.
9. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (ЧАСТЬ 1).// Эксплуатация морского транспорта.- 2017.- № 2 (83).- С. 114-122.
10. Каракаев А. Б. Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя безвнешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматки / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4.
11. Каракаев А.Б., Костенко А. В., Епихин А.И. Электромагнитный момент и механическая характеристика специального однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматки - Эксплуатация морского транспорта.- 2019.- № 3(92).- С.120-126.
12. Каракаев А.Б., Каган А.В. Полиномиальная модель однофазного асинхронного двигателя. – Ленинград, 1984 -7с.-Рукопись представлена СЗПИ. Деп. в Информэлектро в 1985г., №408 эт. – 84 Деп.
13. Маркитантов Б.С., Каракаев А.Б. Исследование пусковых свойств однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств методами планирования эксперимента. В.Сб.:Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава училища – Л.:ВВМИУ им.В.И.Ленина, 1983, с.82-86

References

1. Karakaev A.B., Kostenko A.V. Razrabotka matematicheskoy modeli odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya dlya sudovykh sistem avtomatiki metodami planirovaniya eksperimenta [Development of a mathematical model of a single-phase asynchronous electric motor for ship automation systems by experimental design methods.] Ekspluatatsiya morskogo transporta.- 2020.- № 1(94).- S.154-165.
2. Karakaev, A.B., and A.V. Kostenko. Razrabotka i primenenie odnofaznogo asinhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazosdvigayushchikh ustroystv dlya sudovykh sistem avtomatiki [Development and application of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems]. Sbornik tezisev

- natsional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova». SPb.: Izdatel'stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2018. 91–92
3. Karakaev A.B., Kostenko A.V. Vyyavlenie zavisimostej neobhodimyh dlya postroeniya polinomial'nyh modelej odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya bez vneshnih fazosdvigayushchih ustrojstv dlya sistem sudovoy avtomatiki metodam planirovaniya eksperimenta [Identification of dependencies necessary for constructing polynomial models of a single phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems using experimental design methods]. Ekspluatatsiya morskogo transporta. - 2020.- № 2(95).- S.76-82.
 4. Kopylov N.P. Primenenie vychislitel'nyh mashin v inzhenerno-ekonomicheskikh raschetah [The use of computers in engineering and economic calculations] – M.:Vysshaya shkola, 1980-256s.
 5. Voznesensky V.A. Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyah [Statistical methods of designing an experiment in technical and economic research]. -M.:Finansy i statistika, 1981-263s.
 6. Ivobotenko B. L., Ilyinsky N. F., Kopylov N. P. Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike [Planning an experiment in electromechanics]. -M.:Energiya, 1975 – 184s.
 7. Asaturian V.N. Teoriya planirovaniya eksperimenta [Theory of experimental design]. -M.:Radio i svyaz', 1983 – 248s.
 8. Adler Yu.P. and others. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. - M.: Nauka, 1976 – 285s.
 9. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovyh elektroenergeticheskikh sistem. (CHAST' 1) [Development of methodology, methods and analysis models the influence of various options for building the structure and maintenance and recovery modes operability of ship electric power systems (part 1)]. - Ekspluatatsiya morskogo transporta.- 2017.- № 2 (83).- S. 114-122.
 10. Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. Matematicheskaya model' odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya bezvneshnih fazosdvigayushchih ustrojstv dlya sudovyh sistem avtomatiki [Mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems]. -Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 11.4 (2019)
 11. Karakaev A.B., Kostenko A.V., Epikhin A.I. Elektromagnitnyj moment i mekhanicheskaya harakteristika special'nogo odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya bez vneshnih fazosdvigayushchih ustrojstv dlya sudovyh sistem avtomatiki [Electromagnetic moment and mechanical characteristic of a special single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems]. - Ekspluatatsiya morskogo transporta.- 2019.- № 3(92).- S.120-126.
 12. Karakaev A.B., Kagan A.V. Polinomial'naya model' odnofaznogo asinhronnogo dvigatelya [Polynomial model of a single-phase asynchronous motor]. – Leningrad,1984 -7s.-Rukop[is] predstavlena SZPI. Dep. v Informelektro v 1985g., №408 et. – 84 Dep.
 13. Markitantov B.S., Karakaev A.B. Issledovanie puskovyh svoystv odnofaznogo asinhronnogo dvigatelya bez vneshnih fazosdvigayushchih ustrojstv metodami planirovaniya eksperimenta [Study of the starting properties of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices by experimental design methods]. V.Sb.: - Tezisy dokladov nachuno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava uchilishcha – L.:VVMIU im.V.I.Lenina,1983, s.82-86

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Бахтыреевич Каракаев, доктор технических наук, профессор кафедры основ судовой электроэнергетики (ОСЭЭ) ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», ул. Двинская, 5/7, г.Санкт-Петербург, Российская Федерация, 198035, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru

Karakaev B. Aleksandr, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fundamentals of Marine Electric Power in Admiral Makarov State University of Marine and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru

Александр Васильевич Костенко, аспирант кафедры основ судовой электроэнергетики (ОСЭЭ) ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», ул. Двинская, 5/7, г.Санкт-Петербург, Российская Федерация, 198035, e-mail: san9110@mail.ru

Kostenko V. Aleksandr, Graduate student of the Department of Fundamentals of Marine Electric Power in Admiral Makarov State University of Marine and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: san9110@mail.ru

Поступила в редакцию: 29.07.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

Разработка методики расчёта и проектирования однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики с использованием математической модели, полученной с помощью методов планирования эксперимента

А.Б. Каракаев¹, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru, А.В. Костенко¹, e-mail: san9110@mail.ru

¹Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О.Макарова

Аннотация Статья посвящена разработке методики проектирования однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики. Отмечается, что существующие на сегодняшний день известные методики расчёта микромашин не учитывают потерь в стали, что приводит к значительным погрешностям при расчёте двигателя. Авторами предлагается применять разработанную уточнённую методику расчёта двигателя для дальнейшего его проектирования. Отмечается, что из выявленных в работе зависимостей важнейшей является зависимость пускового момента от электрического угла между осями обмоток 1 и 44 - α . Где выбор не оптимального электрического угла - крайне негативно сказывается на величине пускового момента однофазной микромашины. Для пояснения особенностей определения активной части двигателя авторами строится график зависимости наружной поверхности и потерь от полезной мощности. Также, в статье авторы приводят номограммы, позволяющие принимать проекторочные решения не только на основании расчёта, но и графоаналитическим методом. Результатом работы является получение новой методики расчёта и проектирования однофазной микромашины для систем судовой автоматики, используя для расчёта математическую модель, полученную с помощью методов планирования эксперимента.

Ключевые слова: Методы планирования эксперимента, полиномиальная модель, однофазный асинхронный электродвигатель, система судовой автоматики, методика расчёта, методика проектирования, внешние фазосдвигающие устройства, математическая модель.

Development of a methodology for calculating and designing a single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems using a mathematical model obtained using experimental planning methods

Aleksandr B. Karakaev¹, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru, Aleksandr V. Kostenko¹, e-mail: san9110@mail.ru

¹Admiral Makarov State university of marine and inland shipping, Petersburg, Russian Federation

Abstract The article is devoted to the development of a design technique for a single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. It is noted that the currently known methods for calculating micromachines do not take into account losses in steel, which leads to significant errors in calculating the engine. The authors propose to apply the developed refined methodology for calculating the engine for its further design. It is noted that of the dependences identified in the work, the most important is the dependence of the starting torque on the electric angle between the axes of the windings 1 and 44 - α . Where the choice of a non-optimal electrical angle has an extremely negative effect on the magnitude of the starting torque of a single-phase micromachine.

To clarify the features of determining the active part of the engine, the authors build a graph of the dependence of the outer surface and losses on the net power. Also, in the article, the authors provide nomograms that allow making design decisions not only on the basis of calculation, but also by the graphical analytical method.

The result of the work is to obtain a new methodology for calculating and designing a single-phase micromachine for ship automation systems, using for the calculation a mathematical model obtained using experimental planning methods.

Key words: Experiment planning methods, polynomial model, single-phase asynchronous electric motor, ship automation system, calculation method, design method, external phase-shifting devices, mathematical model.

Введение

Известно, что при проектировании электрических микромашин можно ставить задачу их расчета двояко:

- задан тип машины, геометрия ее активной части, обмотки и их данные, необходимо рассчитать характеристики машины;

- заданы характеристики машины, необходимо рассчитать оптимальную геометрию ее активной части, а также обмотки и их данные.

В первом случае проводится проверочный расчёт машины, и задача решается однозначно. Вторая постановка относится к синтезу электрической машины, и задача имеет множество решений,

которое несколько ограничивается ГОСТ 16264.0-85, накладывающим определенные ограничения на габаритные размеры электрических микромашин.

В этом случае задача проектирования микромашины состоит в том, чтобы при заданных ГОСТ 16264.0-85 габаритных размерах при учете условий охлаждения, допустимых перегревов определить геометрию магнитопровода и электромагнитные нагрузки, при которых характеристики проектируемой микромашины были бы оптимальными. Существующая методика расчёта однофазного асинхронного электродвигателя (ОАД) без внешних фазосдвигающих устройств (ВФСУ) для систем судовой автоматики [1] не учитывает потерь в стали, что приводит к значительным погрешностям

при расчёте двигателя. Кроме того, при её разработке не рассматривались области допустимых значений параметров, обеспечивающих требуемые характеристики. Учитывая вышеизложенное, принят следующий порядок уточнения методики расчёта ОАД [2]:

- особенности определения размеров активной части двигателя;
- особенности расчёт параметров, в том числе параметров намагничивающей ветви, с использование разработанных номограмм;
- расчёт основных характеристик с учетом потерь в стали;
- особенности расчёта характеристик двигателя универсального исполнения.

1. Особенности определения размеров активной части двигателя.

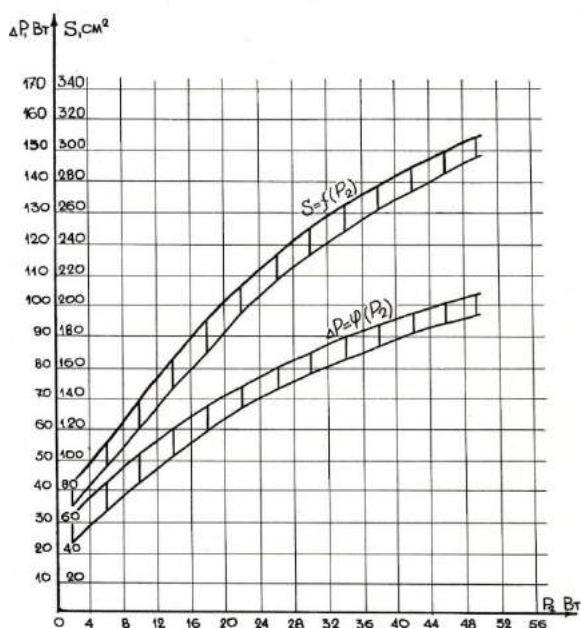


Рис. 1. Зависимость наружной поверхности и потерь от полезной мощности.

В основу определения размеров активной части двигателя берётся зависимость наружной поверхности охлаждения от полезной мощности: $S = f(P_2)$ рис 1., полученную в ходе предварительных исследования ОАД [3].

Для определения диаметра ротора D_p , наружного диаметра статора D_c и активной длины L необходимо задаться отношением наружного диаметра статора D_c к диаметру ротора D_p и отношением активной длины L к наружному диаметру статора D_c .

$$k_d = \frac{D_c}{D_p} \tag{1}$$

$$k_l = \frac{L}{D_c} \tag{2}$$

Тогда:

$$\frac{L}{D_c} = \frac{L}{k_d * D_p} = k_l \tag{3}$$

Откуда:

$$\frac{L}{D_p} = k_l k_d \tag{4}$$

Учитывая, что выражение для S имеет вид:

$$S = \frac{\pi D_p^2}{2} + \pi D_p L \tag{5}$$

выражение для D_p найдется как:

$$D_p = \sqrt{\frac{2S}{\pi(1 + 2k_l k_d)}} \tag{6}$$

Таким образом, при заданном значении полезной мощности можно по рис. 1 найти охлаждающую поверхность S , а затем главные размеры.

2. Расчет параметров ОАД без ВФСУ для систем судовой автоматики.

Однофазный асинхронный двигатель имеет симметричный магнитопровод с распределенными обмотками на статоре и короткозамкнутый ротор, поэтому расчёт магнитной цепи и параметров можно производить по общепринятым методикам [4].

Особенностью является учёт потерь в стали [5]. Последовательность расчёта основных параметров ОАД без ВФСУ для систем судовой автоматики используется следующая:

- определение формы и размеров пазов;
- расчёт магнитной цепи;
- разработка схемы обмоток;
- расчёт параметров обмоток ОАД.

2.1. Определение формы и размеров пазов ОАД

Существенную роль при проектировании ОАД без ВФСУ для систем судовой автоматики играет выбор геометрии листов магнитопровода как статора, так и ротора [6].

Следует отметить, что неудачный выбор геометрии, и, в частности, пазово-зубцовых слоев, не может быть в дальнейшем скомпенсирован ни типом обмотки, ни ее данными.

В первую очередь необходимо определить числа пазов магнитопроводов. Будем исходить при этом как из опыта проектирования [7], так и литературных данных и рекомендаций [8].

Синтезируя все эти данные для асинхронных двигателей при числе пар полюсов, равном единице, рекомендуются соотношения чисел пазов статора и ротора, показанные в таблице 1 [9].

Таблица 1

Соотношение чисел пазов статора и ротора

Число пазов статора	Число пазов ротора (прямые пазы)	Число пазов ротора (скошенные пазы)
18	23	26
24	16,32	31,33,34,35
30	22,28	20,21,23,37,39,40
36	26,28,44,46	25,27,29,43,45,47
42	32,34,50,52	
48	38,40,56,58	37,39,41,55,57,59

Первоначально выбранные числа пазов магнитопроводов статора и ротора должны быть проверены индукцию и технологичность. Магнитный поток на пару полюсов:

$$\Phi = B_{\delta} \frac{DL}{p} = 2h_j L B_{mj} k_c \quad (7)$$

где: B_{δ} – индукция в зазоре;

L – длина пакета;

h_j – высота ярма магнитопровода;

B_{mj} – максимальная индукция в ярме;

k_c – коэффициент заполнения сталью;

D – диаметр расточки.

Из (7)

$$h_j = \frac{D}{2p\gamma_j k_c} \quad (8)$$

В последнем выражении:

$$\gamma_j = \frac{B_{mj}}{B_{\delta}} \quad (9)$$

Если считать, что магнитный поток весь проходит по зубцу, то:

$$B_{\delta} \frac{pD}{z} = B_{mz} b_z k_c \quad (10)$$

где: z – число зубцов;

B_{mz} – максимальная индукция в зубце;

b_z – ширина зубца в самом узком месте.

Из зависимости (10) нетрудно получить

$$b_z = \frac{pD}{z\gamma_z k_c} \quad (11)$$

где:

$$\gamma_z = \frac{B_{mz}}{B_{\delta}} \quad (12)$$

Если величины h_j и b_z получаются слишком малыми и не удовлетворяют требования технологичности, то эти размеры должны быть увеличены. После этого не трудно определить формы и размеры пазов.

2.2. Расчёт магнитной цепи и разработка схемы обмотки

Однофазный асинхронный двигатель имеет симметричный магнитопровод с распределенными обмотками на статоре и короткозамкнутый ротор, поэтому расчёт магнитной цепи и параметров можно производить по общепринятым методикам [10,11]. При этом определяются МДС ОАД без ВФСУ для систем автоматики на пару полюсов F_n , коэффициент насыщения K_n и потери в стали P_c .

В результате исследований, проведенных в предыдущей статье [3] получена зависимость максимального и пускового момента ОАД от пространственного угла α между осями обмоток. Как выяснилось, максимумы пускового M_n и максимального M_m моментов ОАД без ВФСУ лежат в интервале значений α равных $100 \div 120$ электрических градусов и $280 \div 300$ электрических градусов.

Очевидно, что, учитывая последнее обстоятельство, необходимо расположить все обмотки ОАД таким образом, чтобы угол α лежал в указанных пределах. Кроме того, в этом случае 3-и пространственные гармонические МДС обмоток 1 и 44 частично друг друга компенсируют [12].

Известно, что однофазную обмотку можно получить из трехфазной, если из нее исключить одну фазу, концы оставшихся фаз соединить вместе. В этом случае обмотки занимают лишь $2/3$ пазов статора и её коэффициент распределения равен 0,828 [13].

Такая обмотка значительно выгоднее, чем обмотка, выполненная с заполнением всех пазов машины, т.е. с фазной зоной П, т.к. в ней для получения одинаковых ЭДС требуется в 1,32 раза меньше витков (коэффициент распределения однофазной обмотки с заполнением всех пазов равен 0,637). При этом ось полученной однофазной обмотки определяется с помощью звезды пазовых ЭДС, путём сложения ЭДС фаз, из которых формируется однофазная обмотка.

Варьируя соединениями различных двух фаз в однофазную обмотку, а также числом пазов на полюс и фазу q , можно изменить расположение оси этой обмотки в пространстве. Таким образом можно добиться, чтобы расположение осей всех трёх однофазных обмоток соответствовало такому значению α , при котором M_n и M_m максимальны.

Как выявлено в статье [3], оптимальными соотношениями параметров обмоток для обеспечения наибольшего пускового момента являются:

$$\begin{aligned} & - k_4 \geq 0,8 \div 1,0; k_5 \leq 0,04 \div 0,05; \rho_2' \geq 0,4 \div 0,5; \\ & - \rho_4' = 1,0 \div 1,4; \rho_5' = 10 \div 14; \\ & - \text{отношение } \frac{\rho_4'}{\rho_5'} = 0,10 \div 0,12 \\ & - \rho_0 \geq 0,1. \end{aligned} \quad (13)$$

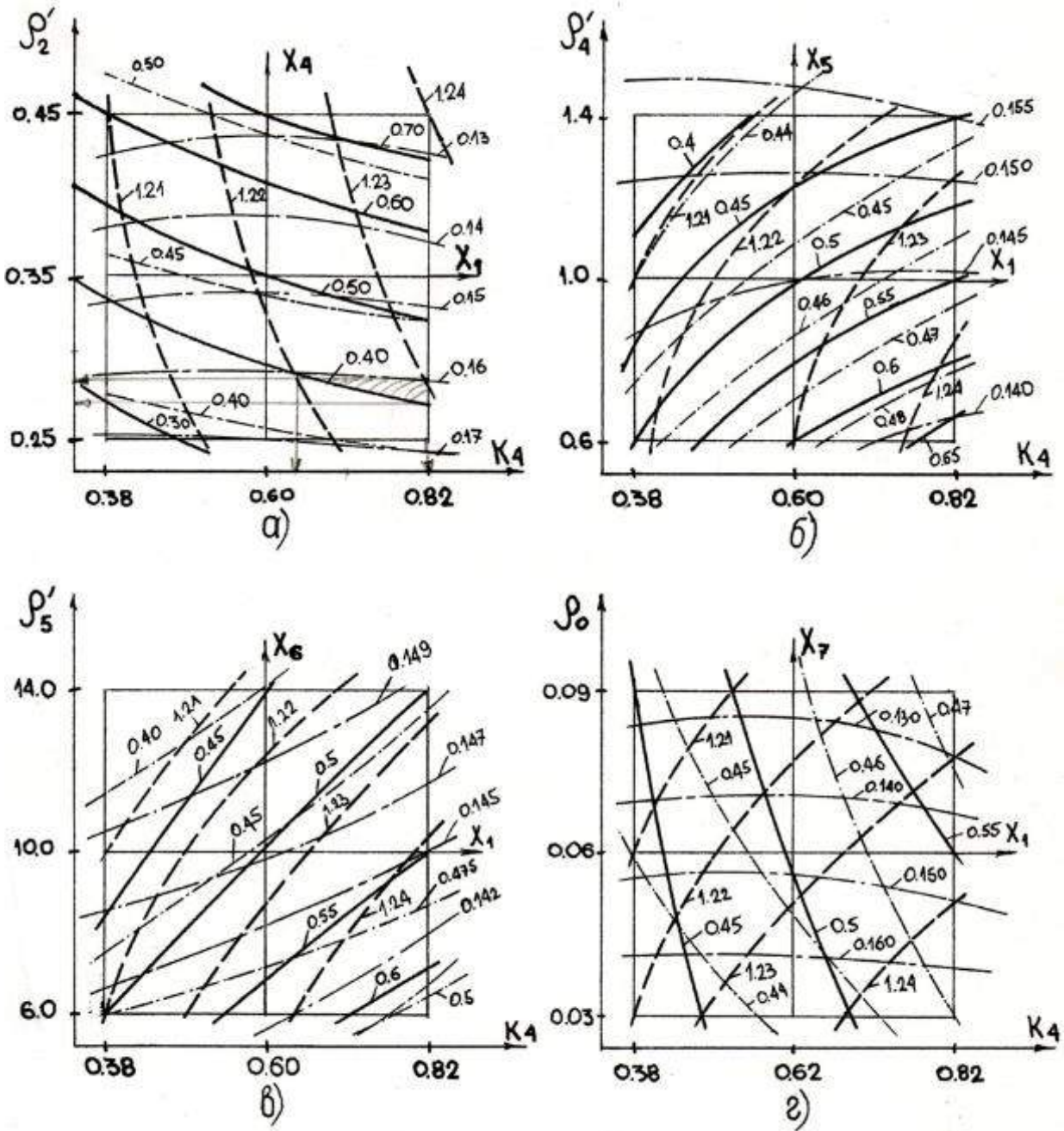


Рис. 2. Номограммы для выбора значений относительных параметров ОАД.

Оптимальными соотношениями параметров обмоток, обеспечивающими наибольший КПД являются:

- $k_4 \approx 0,65$; $k_5 \leq 0,04 \div 0,05$;

- $\rho_1 \approx 0,3$; $\rho'_2 \leq 0,3 \div 0,4$;

- $\rho'_4 = 0,6 \div 1,0$; $\rho'_5 = 6 \div 10$; - $\rho_0 \leq 0,03$.

(14)

применяемыми при проектировании электрических машин с симметричным магнитопроводом.

3. Количество витков в дополнительных обмотках определяется в зависимости от требований технического задания из условий обеспечения требуемых характеристик, с учётом результатов исследования ОАД методами планирования эксперимента.

4. После расчётов параметров двигателя должна быть проведена предварительная оценка

основных характеристик по полиномам [3]. При получении результатов не удовлетворяющих требований технического задания, по номограммам рис. 2 и рис.3 могут уточняться значения относительных параметров, обеспечивающих требуемые характеристики, после чего процедура предварительной оценки их величин повторяется.

5. Уточненный расчёт может производиться с использованием разработанной программы на ЭВМ.

Литература

1. Каракаев А.Б., Костенко А. В. Разработка математической модели однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматизации методами планирования эксперимента - Эксплуатация морского транспорта.- 2020.- № 1(94).- С.154-165.
2. Каракаев А. Б. Разработка и применение однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматизации / А. Б. Каракаев, А.В. Костенко // Сборник тезисов национальной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». — СПб.: Издательство ГУМРФ им. С.О. Макарова, 2018. — С. 91-92.
3. Каракаев А.Б., Костенко А. В. Выявление зависимостей необходимых для построения полиномиальных моделей однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматизации методом планирования эксперимента - Эксплуатация морского транспорта.- 2020.- № 2(95).- С.76-82.
4. Вольдек А.Н. Электрические машины – Л.:Энергия, 1974-782с.
5. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях -М.:Финансы и статистика, 1981-263с.
6. Ивоботенко Б.Л., Ильинский Н.Ф., Копылов Н.П. Планирование эксперимента в электромеханике - М.:Энергия, 1975 – 184с.
7. Асатурян В.Н. Теория планирования эксперимента -М.:Радио и связь, 1983 – 248с.
8. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий – М.:Наука, 1976 – 285с.
9. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (ЧАСТЬ 1). Эксплуатация морского транспорта.- 2017.- № 2 (83).- С. 114-122.
10. Каракаев А. Б. Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя безвнешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматизации // А. Б. Каракаев, А. В. Костенко «Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.» — 2019. — Т. 11. — № 4.
11. Каракаев А.Б., Костенко А. В., Епихин А.И. Электромагнитный момент и механическая характеристика специального однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматизации - Эксплуатация морского транспорта.- 2019.- № 3(92).- С.120-126.
12. Каракаев А.Б., Каган А.В. Полиномиальная модель однофазного асинхронного двигателя. – Ленинград, 1984 -7с.-Рукопись представлена СЗПИ. Деп. в Информэлектро в 1985г., №408 эт. – 84 Деп.
13. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для электроэнергетических спец. вузов — М.: Электротехника, 2013. — 440 с

References

1. Karakaev A.B., Kostenko A.V. Razrabotka matematicheskoy modeli odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya dlya sudovykh sistem avtomatiki metodami planirovaniya eksperimenta [Development of a mathematical model of a single-phase asynchronous electric motor for ship automation systems by experimental design methods.] Ekspluatatsiya morskogo transporta.- 2020.- № 1(94).- S.154-165.
2. Karakaev, A.B., and A.V. Kostenko. "Razrabotka i primeneniye odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazosdvigayushchikh ustroystv dlya sudovykh sistem avtomatiki." Sbornik tezisev natsional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova». SPb.: Izdatel'stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2018. s.91–92
3. Karakaev A.B., Kostenko A.V. Identification of dependencies necessary for constructing polynomial models of a single phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems using experimental design methods Marine operation transport. 2020. No 2 (95). S.76-82.
4. Voldek A.N. Elektricheskie mashiny [Electric machines] – L.:Energiya, 1974-782s.
5. Voznesensky V.A. Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh [Statistical methods of designing an experiment in technical and economic research]. -M.:Finansy i statistika, 1981-263s.
6. Ivobotenko B. L., Ilyinsky N. F., Kopylov N. P. Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike [Planning an experiment in electromechanics]. -M.:Energiya, 1975 – 184s.
7. Asaturian V.N. Teoriya planirovaniya eksperimenta [Theory of experimental design]. -M.:Radio i svyaz', 1983 – 248s.

8. Adler Yu.P. and others. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. - M.: Nauka, 1976 – 285s.
9. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatsiej sudovyh elektroenergeticheskikh sistem. (CHAST' 1) [Development of methodology, methods and analysis models the influence of various options for building the structure and maintenance and recovery modes operability of ship electric power systems (part 1)]. - Ekspluatsiya morskogo transporta.- 2017.- № 2 (83).- S. 114-122.
10. Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. Matematicheskaya model' odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya bezvneshnih fazosdvigayushchih ustrojstv dlya sudovyh sistem avtomatiki [Mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems]. - Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 11.4 (2019)
11. Karakaev A.B., Kostenko A.V., Epikhin A.I. Elektromagnitnyj moment i mekhanicheskaya harakteristika special'nogo odnofaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya bez vneshnih fazosdvigayushchih ustrojstv dlya sudovyh sistem avtomatiki [Electromagnetic moment and mechanical characteristic of a special single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems]. - Ekspluatsiya morskogo transporta.- 2019.- № 3(92).- S.120-126.
12. Karakaev A.B., Kagan A.V. Polinomial'naya model' odnofaznogo asinhronnogo dvigatelya [Polynomial model of a single-phase asynchronous motor]. – Leningrad, 1984 -7s.-Rukop[is] predstavlena SZPI. Dep. v Informelektro v 1985g., №408 et. – 84 Dep.
13. Venikov V. A. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primeritel'no k zadacham elektroenergetiki): ucheb. posobie dlya elektroenergeticheskikh spec. vuzov [The theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry): textbook. allowance for electricity special. universities] — M.: Elektrotehnika, 2013. — 440 s

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Бахтыреевич Каракаев, доктор технических наук, профессор кафедры основ судовой электроэнергетики (ОСЭЭ) ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», ул. Двинская, 5/7, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 198035, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru

Aleksandr B. Karakaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fundamentals of Marine Electric Power in Admiral Makarov State University of Marine and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: Aleksandr.Karakaev@list.ru

Александр Васильевич Костенко, аспирант кафедры основ судовой электроэнергетики (ОСЭЭ) ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», ул. Двинская, 5/7, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 198035, e-mail: san9l10@mail.ru

Aleksandr V. Kostenko, Graduate student of the Department of Fundamentals of Marine Electric Power in Admiral Makarov State University of Marine and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: san9l10@mail.ru

Поступила в редакцию: 29.07.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 629.127 (621.165)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.036>

Влияние вращающегося соплового аппарата на характеристики осевых малорасходных турбин

С.В. Чехранов¹, e-mail: turboroom@yandex.ru Р.Р. Симашов¹, e-mail: forsimashov@yandex.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Экспериментально исследуются различные компоновки турбинных ступеней с целью обеспечения многорежимности у осевых малорасходных турбин. Определено, что под многорежимностью понимается способность турбины поддерживать величину КПД неизменной, или с небольшими изменениями в достаточно широком диапазоне изменения внешних нагрузок. С новой точки зрения обращено внимание на то, что наиболее выраженными свойствами многорежимности обладают турбины в состав которых входит вращающийся сопловой аппарат. В этой связи рассмотрены авторские результаты экспериментальных исследований биротативных турбин с большим углом поворота потока и двух-ступенчатых осевых турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса. Выявлено, у исследованных биротативных турбин свойство многорежимности проявляется при степени парциальности, близкой к единице и регулируется путем изменения соотношения частот вращения соплового аппарата и рабочего колеса. А у одновальных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса свойство многорежимности проявляется в широком диапазоне изменения степени расширения в турбине также при полном подводе рабочего тела.

Ключевые слова: Вращающийся сопловой аппарат; ступень; свойство многорежимности; частичное облопачивание рабочего колеса

Influence of a rotating nozzle diaphragm on the characteristics of axial low-consumption turbines

Sergei V. Chekhranov¹, e-mail: turboroom@yandex.ru, Rafail R. Simashov¹, e-mail: forsimashov@yandex.ru¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Various arrangements of turbine stages are experimentally investigated in order to ensure multiplicity of operating levels for axial low-consumption turbines. It has been determined that multiplicity is understood as the ability of a turbine to maintain the efficiency value unchanged, or with small changes in a fairly wide range of external loads. From a new point of view, attention is drawn to the fact that the most marked properties of operating levels multiplicity are relevant to the turbines which include a rotating nozzle diaphragm. In this regard, the author's results of experimental studies of birotative turbines with a large flow angle and two-stage axial turbines with partial blading of the running wheel are considered. It was revealed that in the investigated birotative turbines the property of multiplicity is manifested at a degree of partiality close to 1 and is regulated by changing the ratio of the rotation frequencies of the nozzle diaphragm and the running wheel. And in single-shaft turbines with partial blading of the running wheel, the multiplicity property is manifested in a wide range of changes in the degree of expansion in the turbine, also with full supply of the working fluid.

Key words: Rotating nozzle diaphragm; stage; multiplicity of operating levels; partial blading of the running wheel

Введение

Одной из ограничивающих проблем применения турбин в транспортных энергетических установках является жесткая привязка оптимума КПД турбины к характеристическому числу u/c_0 , где c_0 находится из располагаемого теплоперепада на ступень. Поэтому турбинные установки стремятся использовать там, где нет резких изменений нагрузок. В противном случае приходится применять достаточно сложные системы регулирования мощности, что в целом приемлемо для крупных турбоустановок, например, для стационарных электростанций, или главных судовых двигателей. Гораздо сложнее обстоит дело с вспомогательными двигателями, где обычно применяются малорасходные турбины (МРТ).

В МРТ не всегда удается применить способы регулирования мощности, используемые в полноразмерных турбинах. Прежде всего, из за ограничений по массогабаритным параметрам. В этой связи представляют интерес авторские исследования нетрадиционных конструкций малорасходных турбин, в которых проявляются свойства многорежимности. Это так называемые турбины безвентиляционного типа, к каковым относят турбины с большим углом поворота потока,

известные как турбины конструкции ЛПИ, и турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса. Свойства многорежимности проявляют те турбины, в состав которых входит вращающийся сопловой аппарат (ВСА).

1. ВСА в турбинах с большим углом поворота потока

Вращающийся сопловой аппарат может использоваться как самостоятельная турбина, работающая по принципу Сегнера колеса, так и как ступень в многоступенчатой конструкции. Турбины типа Сегнера колеса находят свое применение в энергетике, но очень ограничено из за низкого КПД и применяются там, где требования надежности превалируют над требованиями энергетической эффективности. Конструкция ВСА показана на рис. 1. Характеристики такой турбины с четырьмя сужающимися соплами и осевым выходом потока показаны на рис. 2.

Более предпочтительно использовать ВСА в качестве первой ступени многоступенчатой турбины. Причем, выход потока из сопел ВСА может осуществляться не только в радиальном направлении как в центробежных турбинах, но и в осевом, как в традиционной осевой ступени. При

центральном подводе рабочего тела через полый вал поток движется от оси вала к соплам по радиальным каналам в диске ВСА. Радиальные каналы выполняют роль центробежного компрессора, поэтому давление рабочего тела перед соплами превышает начальное давление P_0^* на входе в ступень, что способствует увеличению коэффициента расхода через ВСА и повышению его эффективности.

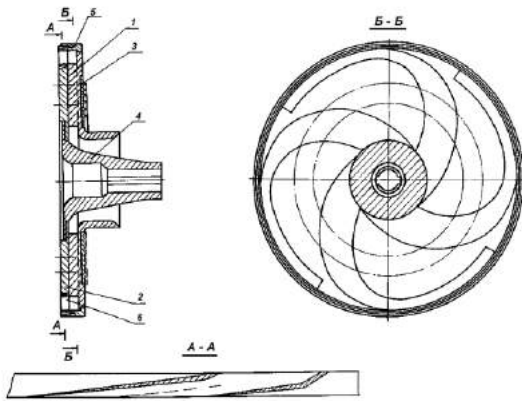


Рис. 1. Вращающийся сопловой аппарат

1 – диск ВСА с радиальными каналами; 2 – передний диск с нарезанными в нем соплами; 3 – радиальные лабиринтные уплотнения; 4 – центральный конус подвода; 5 – паз в корпусе ВСА для уплотнительного шипа от РК

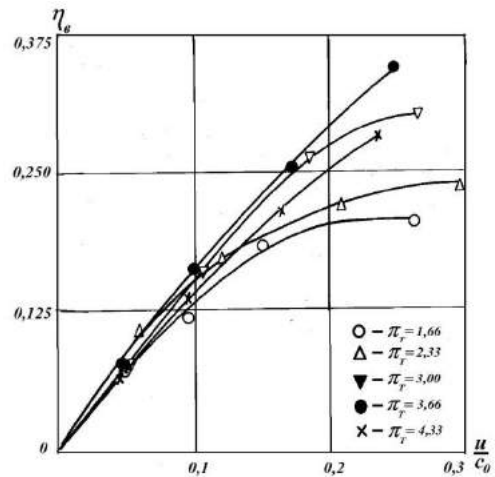


Рис. 2. Характеристики одноступенчатой турбины типа ВСА

Особенно высокую эффективность показали ВСА в составе биротативной турбины с большим углом поворота потока. Угол установки сопел равнялся 4 градуса. Конструкция такой биротативной ступени показана на рис. 3. Турбины подобного типа подробно описаны в [1]. Особенность конструкции таких турбин заключается в том, что при малом угле установки сопел существенно увеличивается длина косога среза сопла, что позволяет даже при малом количестве сопел значительно увеличить степень парциальности турбины и тем самым снизить, или вообще убрать потери энергии от парциальности. В приводимом случае турбина имела всего четыре сопла, но при этом степень парциальности равную единице.

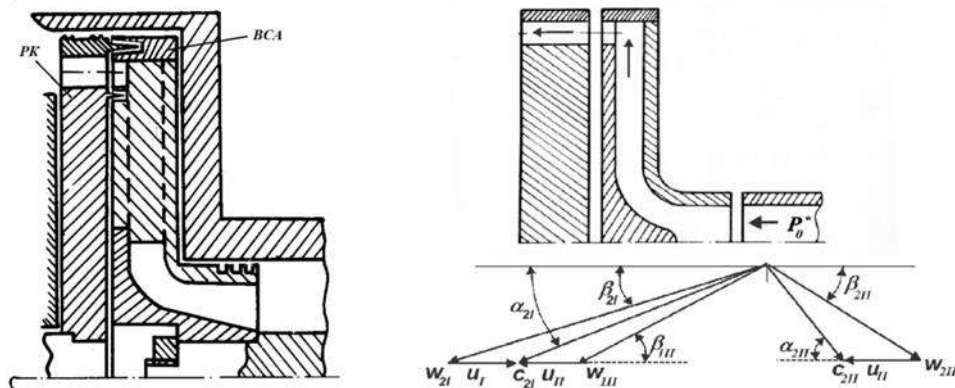


Рис. 3. Биротативная турбина

Для предотвращения растекания потока, выходящего из сопел, в радиальный зазор, как на периферии рабочих лопаток, так и в их корневой зоне, выполняются уплотнения конструкции А.К. Шемагина в виде кольцевых шипов, входящие в пазы, выполненные в диске ВСА.

Отличие ступеней с неподвижным и вращающимся сопловыми аппаратами заключается в том, что оптимум КПД этих ступеней достигается при разных значениях характеристического числа u/c_0 . У активной ступени с неподвижным СА при

полном подводе рабочего тела (u/c_0) опт стремится к 0,5. А у отдельно взятого ВСА оптимум КПД достигается при $u/c_0 = 1$. Поэтому у биротативной турбины подбирают оптимальное сочетание частот вращения ВСА и РК. На рис. 4 показаны результаты экспериментального исследования биротативной турбины с $D_{cp} = 200$ мм и $\alpha_I = 4$ градуса при расчетной степени расширения в турбине $\pi_T = 4,33$. Обозначим окружную скорость ВСА через u_I , а окружную скорость РК через u_{II} .

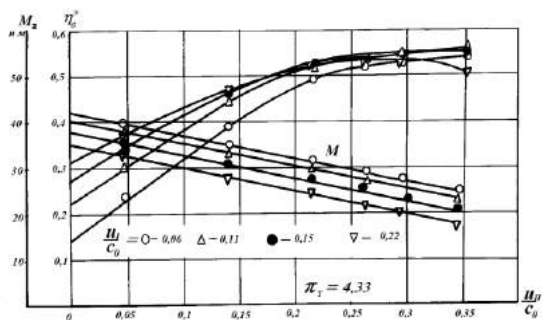


Рис. 4. Изменение внутреннего КПД и крутящего момента биротативной турбины в зависимости от характеристического числа РК при изменении характеристического числа ВСА

Как видно из графика, с увеличением u_1/c_0 КПД турбины растет и при этом зависимость его изменения становится очень пологой. В диапазоне u_1/c_0 от 0,2 до 0,35 КПД практически не меняется, что свидетельствует о таком качестве турбины как многорежимность [2]. Такие же качества демонстрирует биротативная турбина с ВСА и при других значениях углов и π_r . Иначе говоря, регулирование мощности таких турбин можно производить оптимизацией соотношения рабочих частот вращения ВСА и РК при изменении внешней нагрузки.

2. ВСА в турбинах с частичным облопачиванием рабочего колеса

В свете вышесказанного представляют интерес исследования осевых двухступенчатых МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса [3] (рис.5).

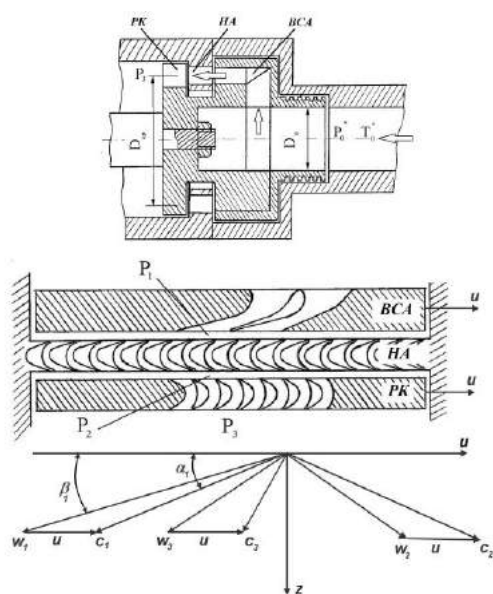


Рис. 5. Схема осевой двухступенчатой МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса

В этой турбине также есть ВСА с центральным подводом рабочего тела и с наличием компрессорного эффекта. Но в отличие от биротативной турбины вышеописанного типа здесь ВСА и РК находятся на одном валу, что исключает возможность оптимизации соотношения их частот

вращения, а между ними располагается неподвижный направляющий аппарат (НА). Кроме того, углы установки сопел и рабочих лопатках выбираются в оптимальном диапазоне, т.е. как и у обычных традиционных турбин. Если такая турбина выполняется парциальной, то облопаченный сектор РК располагается против активной дуги соплового аппарата (см. рис.). Характеристики такой турбины показаны на рис. 6 и 7.

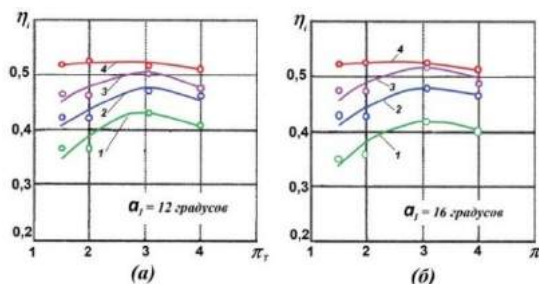


Рис. 6. Характеристики турбин с ВСА и частичным облопачиванием РК для $\alpha_1 = 12^\circ$ и $\alpha_1 = 16^\circ$

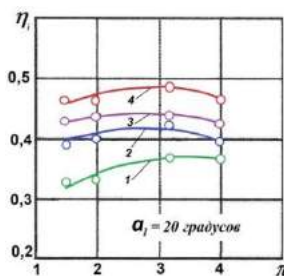


Рис. 7. Характеристики турбин с ВСА и частичным облопачиванием РК для $\alpha_1 = 20^\circ$

Графики на рисунках соответствуют следующим параметрам: а) – для $\alpha_1 = 12^\circ$ при 1 - $\varepsilon = 0,143$; 2 - $\varepsilon = 0,286$; 3 - $\varepsilon = 0,429$; 4 - $\varepsilon = 1$; б) – для $\alpha_1 = 16^\circ$ при 1 - $\varepsilon = 0,11$; 2 - $\varepsilon = 0,22$; 3 - $\varepsilon = 0,44$; 4 - $\varepsilon = 1$

На рис.7 – для $\alpha_1 = 20^\circ$ при 1 - $\varepsilon = 0,091$; 2 - $\varepsilon = 0,182$; 3 - $\varepsilon = 0,455$; 4 - $\varepsilon = 1$.

Исследования осевых двухступенчатых МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса проводились при изменении угла установки сопел α_1 , степени парциальности ε и степени расширения в турбине π_r .

Из графиков видно, что при степени парциальности $\varepsilon = 1$ для любых углов α_1 турбина проявляет свойства многорежимности в широком диапазоне изменения степени расширения в турбине π_r . А для турбины с $\alpha_1 = 20^\circ$ это свойство проявляется даже для вариантов парциального выполнения турбины. Тенденцию выявления особенностей турбин, проявляющих свойство многорежимности можно наблюдать в работах [4, 5, 6, 7, 8]

Заключение

1. Если принять, что под свойством многорежимности турбины понимается способность поддерживать неизменным КПД в достаточно широком диапазоне изменения нагрузок, то применение вращающегося соплового аппарата с центральным подводом рабочего тела обеспечивает турбине свойство многорежимности. При этом ВСА в составе многоступенчатой осевой турбины может

использоваться как в двухвальной схеме с биротативными ступенями, так и в одновальной турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса. Наиболее наглядно выражено свойство многорежимности в турбинах с полным подводом рабочего тела. Регулирование мощности турбины

при изменении внешней нагрузки в биротативных турбинах обеспечивается изменением соотношения частот вращения ВСА и РК, а в турбинах с частичным облопачиванием рабочего колеса свойство многорежимности обеспечивается автоматически при полном подводе рабочего тела.

Литература

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161.
2. Моделирование и многорежимная оптимизация малорасходных турбин / Рассохин, В.А., Бусурин, В.Н., Садовничий В.Н. и др. // Тез. докл. Юбилейной научи.-техн. конф. «Инновационные наукоёмкие технологии для России». — СПб: СПбГТУ, 1995. - С. 39.
3. Чехранов С.В. Экспериментальные исследования двухступенчатых малорасходных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса. //Вестник ТОГУ, №3 (30), 2013, с. 73-80.
4. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2013. - №1 (166). - С. 45-53.
5. V.A. Ponomarev, Y.V. Sotsenko Using contra-rotating rotors for decreasing sizes and component number in small GTE Proceedings of International Gas Turbine Congress and Aero-engine Congress and Exposition, Cologne (1992)
6. G. Paniagua, S. Szokol, H. Kato, G. Manzini, R. Varvill Contra-rotating turbine aerodesign for an advanced hypersonic propulsion system AIAA Journal of Propulsion and Power, 24 (6) (2008), pp. 1269-1277
7. F. Tang, X.L. Zhao, J.Z. Xu The application of counter-rotating turbine in rocket turbopump International Journal of Rotating Machinery (2008), p. 7
8. J.F. Louis Axial flow contra-rotating turbines Proceedings of the Gas Turbine Conference and Exhibit, Houston (1985)

References

1. Rassokhin, V.A. Turbiny konstruksii LPI: Preimushchestva, kharakteristiki, opyt razrabotki i primeneniye [LPI design turbines: Advantages, characteristics, development experience and applications] Trudy СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161.
2. Modelirovaniye i mnogorezhimnaya optimizatsiya maloraskhodnykh turbin [Modeling and multi-mode optimization of low-cost turbines] / Rassokhin, V.A., Busurin, V.N., Sadovnichiy V.N. i dr. // Tez. dokl. Yubileynoy nauchi.-tekh. konf. «Innovatsionnyye naukoymkiye tekhnologii dlya Rossii». — SPb: SPbGTU, 1995. - S. 39.
3. Chekhranov S.V. Eksperimental'nyye issledovaniya dvukhstuppenchatykh maloraskhodnykh turbin s chastichnym oblopachivaniyem rabocheho koleasa [Experimental studies of two-stage low-flow turbines with partial impeller clouding]. //Vestnik TOGU, №3 (30), 2013, s. 73-80.
4. Issledovaniye osobennostey techeniya v maloraskhodnykh turbinnykh stupenyakh konstruksii LPI [Investigation of flow features in low-flow turbine stages of LPI design] / N.A. Zabelin, G.L. Rakov, V.A. Rassokhin i dr. // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. - 2013. - №1 (166). - S. 45-53.
5. V.A. Ponomarev, Y.V. Sotsenko Using contra-rotating rotors for decreasing sizes and component number in small GTE Proceedings of International Gas Turbine Congress and Aero-engine Congress and Exposition, Cologne (1992)
6. G. Paniagua, S. Szokol, H. Kato, G. Manzini, R. Varvill Contra-rotating turbine aerodesign for an advanced hypersonic propulsion system AIAA Journal of Propulsion and Power, 24 (6) (2008), pp. 1269-1277
7. F. Tang, X.L. Zhao, J.Z. Xu The application of counter-rotating turbine in rocket turbopump International Journal of Rotating Machinery (2008), p. 7
8. J.F. Louis Axial flow contra-rotating turbines Proceedings of the Gas Turbine Conference and Exhibit, Houston (1985)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Валентинович Чехранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52-б, e-mail: turboroom@yandex.ru

Sergei V. Chekhranov, Professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52-b, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

Рафаиль Равильевич Симашов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), Ass. Prof., Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 06.09.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 629.127 (621.165)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.037>

Выбор оптимальной проточной части и программы регулирования турбопривода автономного необитаемого подводного аппарата

Р.Р. Симашов¹, e-mail: forsimashov@yandex.ru, С.В. Чехранов¹, e-mail: turboroom@yandex.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Обеспечение высокой экономичности не только на режимах номинальной мощности, но и на частичных режимах при изменении внешних параметров приводит к необходимости оптимизации проточной части турбины с объективным учетом ее характеристик на переменных режимах. Приводятся результаты многорежимной оптимизации МРТ в составе ЭУ АНПА на базе подхода разработанного авторами. Представлены основные результаты сравнительного анализа многорежимной оптимизации МРТ с оптимизацией на *i*-тый режим и работающей на остальных режимах как переменных для различных программ регулирования мощности. Выявлено сильное влияние на результаты многорежимной оптимизации основного ограничения в виде равенства мощности турбины задаваемой графиком нагрузки, а также программ регулирования. Возможность применения соплового регулирования приводит к ослаблению степени воздействия основного ограничения. Установлено, что оптимальные геометрические характеристики стремятся к режиму с большей работой. Представлены результаты многорежимной оптимизации МРТ для различных программ регулирования и графиков нагрузок по отношению к результатам многорежимной оптимизации с программой реализующей сопловое регулирование в сочетании с изменением начальных параметров перед турбиной. Многорежимная оптимизация для программы, реализующей сопловое регулирование в сочетании с изменением только начальной температуры перед турбиной, выявила узкую регулировочную способность начальной температуры, и невозможность в некоторых случаях удовлетворения основным ограничениям по равенству мощностей для всех исследуемых графиков нагрузки в пределах заданных ограничений на режимные параметры. Результаты численного эксперимента свидетельствуют, что разработанный автором подход к многорежимной оптимизации МРТ позволяет снизить расход топлива при условии обеспечения заданного графика нагрузок по сравнению с традиционными методами проектирования на номинальный режим.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, малорасходные турбины, программы регулирования, многорежимность, оптимизация, график нагрузки.

Selection of the optimal flow path and control program for the turbo drive of remotely operated underwater vehicle

Rafail R. Simashov¹, e-mail: forsimashov@yandex.ru, Sergei V. Chekhranov¹, e-mail: turboroom@yandex.ru¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

Abstract. Ensuring high efficiency not only at nominal power modes, but also at partial modes when changing external parameters leads to the need to optimize the flow path of the turbine with objective consideration of its characteristics at variable modes. The results of multi-mode optimization of a low-consumption turbine as part of a power unit of remotely operated underwater vehicle based on the approach developed by the authors are presented. The main results of a comparative analysis of multi-mode optimization of a low-consumption turbine with optimization for the *i*-mode and operating in other modes as variables for various power control programs are presented. A strong influence on the results of multi-mode optimization of the main limitation in the form of equality of the turbine power to the power set by the load schedule, as well as control programs is revealed. The possibility of using nozzle regulation leads to a weakening of the degree of influence of the main restriction. It was found that the optimal geometric characteristics tend to the regime with more work. The results of multi-mode optimization of a low-consumption turbine for various control programs and load schedules are presented in relation to the results of multi-mode optimization with a program that implements nozzle control in combination with a change in the initial parameters in front of the turbine. Multimode optimization for a program that implements nozzle regulation in combination with changing only the initial temperature in front of the turbine revealed a narrow adjusting ability of the initial temperature and the impossibility, in some cases, of satisfying the basic constraints on the equality of powers for all the studied load curves within the specified constraints on operating parameters. The results of the numerical experiment indicate that the approach developed by the author to the multi-mode optimization of a low-consumption turbine makes it possible to reduce fuel consumption, provided that a given load schedule is provided in comparison with traditional design methods for the nominal mode.

Key words: marine power units, low-consumption turbines, control programs, multiplicity, optimization, load curve.

Введение

Подводные аппараты широко используются при изучении и освоении Мирового океана. Для выполнения океанологических исследований, разведки и изучения морской флоры и фауны и других подводных работ, не требующих присутствия человека, все шире применяются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [1, 2]. В качестве одного из перспективных типов двигателей

энергетических установок (ЭУ) НПА специалисты рассматривают паровые и газовые турбины. Характерной особенностью ЭУ НПА является работа в широком диапазоне изменения нагрузок и частая смена режимов работы [3, 4]. Поэтому одним из основных требований к таким установкам является требование многорежимности [5]. Обеспечение высокой экономичности не только на режимах номинальной мощности, но и на частичных режимах при изменении внешних параметров приводит к

необходимости оптимизации проточной части турбины с объективным учетом ее характеристик на переменных режимах.

Предложенный в работе [5] подход к многорежимной оптимизации (МО) малорасходных турбины (МРТ) является развитием подходов работ [6, 7] на случай когда в качестве основной исходной информации выступает график нагрузок, с возможностью выбора рациональной программы регулирования. Ниже приводятся результаты многорежимной оптимизации МРТ в составе ЭУ АНПА на базе подхода работы [5].

1. Сравнительный анализ результатов многорежимной и одnoreжимной оптимизации

Численный эксперимент многорежимной оптимизации МРТ был выполнен для автономной паротурбинной установки с максимальной мощностью 516 кВт, предназначенной для АНПА. В качестве нагрузочного устройства использовался лопастной винт (задание частоты вращения винта проводилось в соответствии с винтовой характеристикой АНПА [1]: $N_{ЭУ} \sim n_{винта}^3$). Основная исходная информация для четырех различных графиков нагрузки турбины представлена в табл. 1.

Таблица 1

Основные исходные параметры режимов работы МРТ для четырех графиков нагрузки

Наименование параметра	Номер режима		
	1	2	3
Мощность турбины $N_T^{(i)}$, кВт	103	258	516
Относительное время работы $\bar{\tau}_i$	0.45	0.45	0.10
	0.10	0.80	0.10
	0.30	0.30	0.40
Частота вращения $n_T^{(i)}$, мин-1	17533	23811	30000
Мощность турбины $N_T^{(i)}$, кВт	155	258	516
Относительное время работы $\bar{\tau}_i$	0.80	0.10	0.10
	0.10	0.80	0.10
	0.10	0.10	0.80
Частота вращения $n_T^{(i)}$, мин-1	20092	23811	30000
Противодавление P_2 , МПа	0.18		

Оптимизация режимных и общережимных параметров одноступенчатой МРТ с осесимметричными соплами проводилась в следующей области их изменения: $14^\circ \leq \alpha_1 \leq 20^\circ$, $25^\circ \leq \beta_{1k} \leq 36^\circ$, $0.17 \leq D_k \leq 0.3$, $0.008 \leq l_2 \leq 0.017$, $1.6 \leq f_c \leq 2.78$, $0.6 \leq t_2/b_2 \leq 0.8$ (D_k, l_2 - в [м]); $1.0 \leq P_0^*, \text{МПа} \leq 3.5$, $650 \leq T_0^*, \text{К} \leq 900$, $1 \leq z_c \leq 10$.

Внутренняя исходная информация (величины зазоров, число гребней уплотнений, величины перекрыш и т.д.) задавалась исходя из накопленного экспериментального материала и опыта

проектирования МРТ и оставалась неизменной для всех графиков нагрузок.

Представляет интерес сравнительный анализ результатов многорежимной оптимизации МРТ с оптимизацией на i-тый режим и работающей на остальных режимах как переменных. Основные результаты оптимизации представлены на рис. 1 для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$ и на рис. 2 для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1...3\}$ для различных графиков нагрузок. На рисунках показано относительное увеличение (уменьшение) подведенного на режимах количества тепла для МРТ спроектированных на i-тый режим ($\bar{N} = 1,0; \bar{N} = 0,5; \bar{N} = 0,3$) по отношению к МРТ спроектированной с учетом всего графика нагрузок: $\bar{q}_i = \Delta q_i / (Q_\Sigma^{MO})_{min}$, где $\Delta q_i = (q_i^{\bar{N}_i})_{min} - (q_i^{MO})_{min}$.

Суммирование \bar{q}_i по всем режимам дает относительный суммарный выигрыш от применения многорежимной оптимизации для данного графика нагрузок и программы регулирования:

$$\bar{Q} = \Delta Q_\Sigma / (Q_\Sigma^{MO})_{min} = \sum_{i=1}^3 \bar{q}_i$$

Там же в табличной форме показано изменение по режимам режимных параметров, КПД турбины η_i и расхода рабочего тела G_j для сравниваемых вариантов проточной части МРТ.

Как следует из графиков (рис. 1, 2) относительный суммарный выигрыш \bar{Q} , для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$ лежит в пределах 0.2...13% в зависимости от графика нагрузок и выбранного (расчетного) режима проектирования, а для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1...3\}$ - $\bar{Q} = 0.27...12.7\%$.

Проанализируем полученные результаты. В табл. 2 представлены геометрические и режимные характеристики сравниваемых вариантов МРТ, полученные в результате многорежимной на различные графики нагрузок и одnoreжимной оптимизации.

При одnoreжимной оптимизации на соответствующий режим по критерию оптимизации - минимум подведенной к рабочему телу теплоты, при наличии зависимости $n_{Ti} = f(N_{Ti}^{1/3})$ и ограничения

$$U_k \leq 450 \text{ м/с}$$

приводит к снижению T_0^* и увеличению P_0^* практически до их минимальной и максимальной границ соответственно, что ведет к снижению Q_Σ и увеличению параметра U/C_0^* по причинам описанным выше. Как видно из табл. 2 у МРТ спроектированных на режимы $\bar{N} = 1.0$ и $\bar{N} = 0.5$ наблюдаются пониженные значения высот лопаток РК l_2 и повышенные значения числа сопел

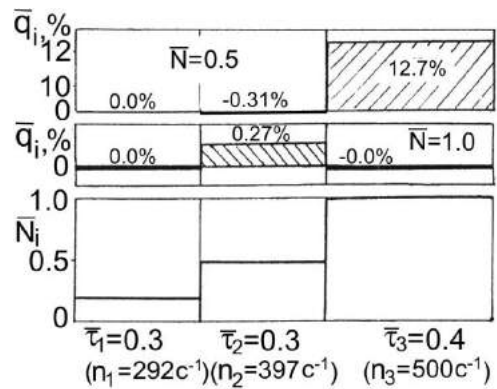
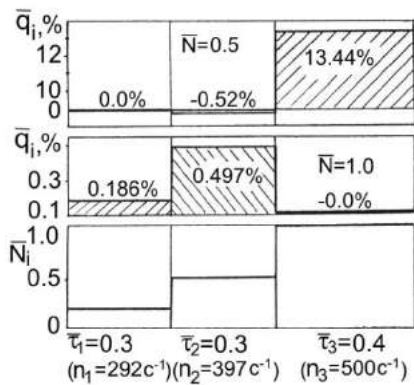
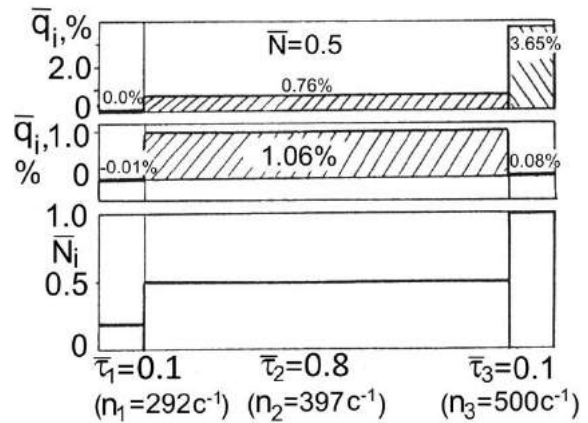
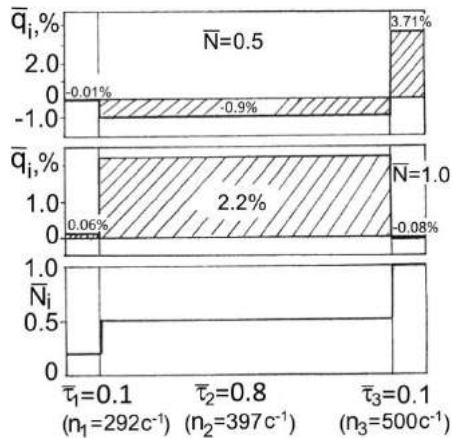
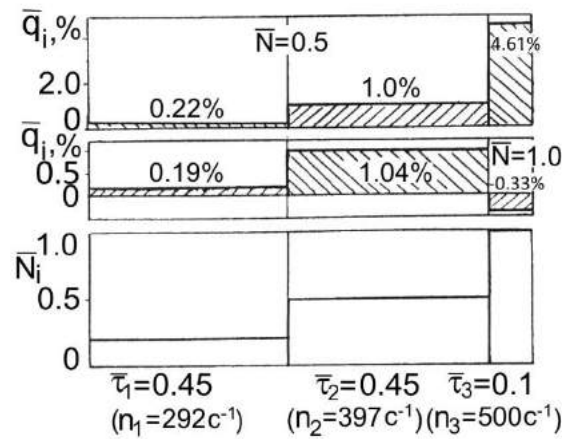
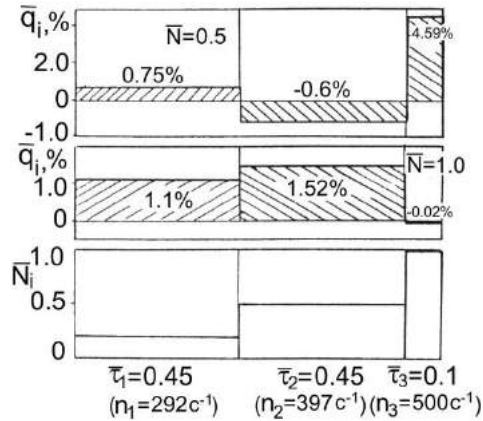
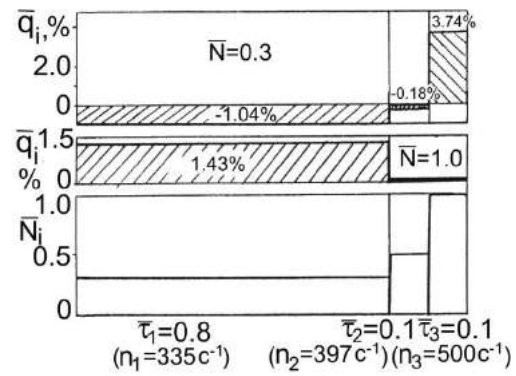
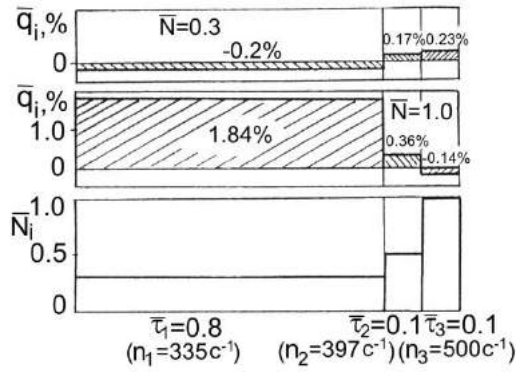


Рис. 1. Увеличение \bar{Q} в ЭУ при оптимизации на i -тые режимы по сравнению с многорежимной для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, Z_{ci}, i = 1 \dots 3\}$

Рис. 2. Увеличение \bar{Q} в ЭУ при оптимизации на i -тые режимы по сравнению с многорежимной для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1 \dots 3\}$

Таблица 2

Геометрические и режимные параметры сравниваемых вариантов МРТ

График нагрузки	α_{1k}	β_{1k}	D_k	l_2	f_c	t_2/b_2	z_c	P_0^* , МПа	T_0^* , К	η_j	G_1 , кг/с	
Многорежимная оптимизация, программа регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i=1...3\}$												
$\bar{\tau}_j = 0.45, 0.45, 0.1$	14.0	29.2	287	13.8	2.78	0.800	2, 4, 7	3.217, 3.370, 3.486	650, 650, 650	0.540, 0.638, 0.699	0.302, 0.633, 1.146	
$\bar{\tau}_j = 0.1, 0.8, 0.1$	14.0	29.7	287	16.0	2.78	0.800	2, 3, 5	2.367, 3.208, 3.495	650, 650, 650	0.567, 0.645, 0.696	0.312, 0.633, 1.150	
$\bar{\tau}_j = 0.3, 0.3, 0.4$	14.0	27.1	280	12.5	2.78	0.744	3, 5, 9	2.769, 3.418, 3.396	650, 650, 650	0.545, 0.630, 0.706	0.311, 0.639, 1.143	
$\bar{\tau}_j = 0.8, 0.1, 0.1$	14.0	29.8	287	16.0	2.78	0.777	2, 3, 5	3.143, 3.186, 3.473	650, 650, 650	0.592, 0.646, 0.696	0.417, 0.634, 1.151	
Многорежимная оптимизация, программа регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i=1...3\}$												
$\bar{\tau}_j = 0.45, 0.45, 0.1$	14.0	28.0	287	15.8	2.77	0.745	5	1.179, 2.090, 3.499	650, 650, 672	0.595, 0.685, 0.702	0.378, 0.670, 1.103	
$\bar{\tau}_j = 0.1, 0.8, 0.1$	14.0	28.0	285	12.8	2.71	0.770	8	1.186, 2.093, 3.500	650, 650, 656	0.588, 0.681, 0.707	0.382, 0.674, 1.122	
$\bar{\tau}_j = 0.3, 0.3, 0.4$	14.2	29.2	287	16.0	2.78	0.600	5	1.155, 2.042, 3.458	650, 650, 650	0.593, 0.684, 0.701	0.383, 0.677, 1.146	
$\bar{\tau}_j = 0.8, 0.1, 0.1$	14.0	29.5	287	17.0	2.59	0.715	4	1.473, 2.072, 3.493	650, 650, 650	0.647, 0.682, 0.704	0.480, 0.675, 1.137	
Однорежимная оптимизация:												
I – программа регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i=1...3\}$; II – программа регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i=1...3\}$												
$\bar{N} = 1.0$	I	14.2	30.3	280	12.5	2.54	0.623	3, 5, 8	2.566, 3.180, 3.494	650, 650, 650	0.548, 0.629, 0.700	0.315, 0.651, 1.145
	II							8	1.163, 2.087, 3.494	650, 650, 650	0.595, 0.672, 0.700	0.381, 0.684, 1.145
$\bar{N} = 0.5$	I	14.0	25.0	287	10.7	2.76	0.800	4, 7, 12	3.024, 3.478, 3.327	650, 650, 886	0.532, 0.640, 0.676	0.311, 0.626, 0.879
	II							7	1.242, 2.207, 3.328	650, 650, 886	0.577, 0.664, 0.676	0.382, 0.681, 0.879
$\bar{N} = 0.3$	I	14.0	29.6	287	15.2	2.74	0.800	2, 3, 6	3.489, 3.499, 3.256	650, 667, 650	0.579, 0.632, 0.700	0.416, 0.617, 1.163
	II							2	1.586, 2.232, 3.499	650, 650, 841	0.639, 0.677, 0.675	0.472, 0.665, 0.916

z_c по сравнению с вариантом - $\bar{N} = 0,3$. Это объясняется повышенными значениями параметра U/C_0^* 0,4 и 0,33 соответственно. Т.е. снижение высоты лопатки компенсируется повышением z_c , а

это приводит к снижению потерь от парциальности и увеличению потерь в РК, что приводит к снижению G_1 и увеличению η_j . Для варианта $\bar{N} = 0,3$ параметр U/C_0^* имеет пониженное значение – 0,28, что приводит к обратному результату: уменьшению

Z_c и повышению l_2 . Наблюдается также повышенные значения угла β_{1k} , что связано со стремлением снизить потери от угла поворота потока, и совпадает с рекомендациями работы [8]. Рассмотренные особенности результатов однорежимной оптимизации по критерию Q_Σ показывают, что для сверхзвуковых МРТ характеризующихся неоптимальными значениями параметра U/C_0^* и работающими в составе однорежимной АЭУ необходимо проведение оптимизации на основе именно прямой задачи турбинной ступени.

На результаты многорежимной оптимизации сильное воздействие оказывает наличие основного ограничения $N_{Ti} = N_{Ti}^{зад}$, а также программа регулирования. Возможность применения соплового регулирования приводит к ослаблению степени воздействия функциональной связи $N_{Ti} = N_{Ti}^{зад}$. Из табл. 2 видно, что оптимальные геометрические характеристики стремятся к режиму с большей работой ($\bar{A}_i = (\bar{N} \cdot \bar{\tau}_i)$). В виду описанных выше особенностей однорежимная оптимизация на режим $\bar{N} = 0.3$ для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, Z_{ci}, i = 1...3\}$ и графика нагрузки $\tau_{1,2,3} = 0.8, 0.1, 0.1$ практически равнозначна многорежимной (рис. 1), незначительный выигрыш наблюдается на режимах 50% и максимальной нагрузок ($\bar{Q} = 0.2\%$). Проектирование на режим максимальной мощности приводит к перерасходу подведенного тепла до 2,3% при работе на данный график нагрузки в основном на режиме минимальной мощности $\bar{N} = 0.3$ за счет снижения η_i и увеличения G_1 (рис. 1, табл. 2) (снижение l_2 и увеличение Z_c приводит к большей площади горловых сечений СА и к увеличению концевых потерь; потери от парциальности при изменении Z_c от 2 до 3 (см. табл. 2, рис. 1) практически остаются неизменными). Оптимизация для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1...3\}$ (отсутствует сопловое регулирование) приводит к выбору минимально возможному числу сопел $Z_c = 4$ ($l_2 = l_2^{max}$) для всех режимов. Удовлетворение основному ограничению $N_{Ti} = N_{Ti}^{зад}$ осуществляется путем изменения степени понижения давления на турбину (рис. 2, табл. 2). Отсутствие дополнительной степени свободы ($Z_c \neq var$) приводит к уменьшению перерасхода подведенного тепла по сравнению с программой регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, Z_{ci}, i = 1...3\}$ при проектировании на режим максимальной нагрузки $\bar{N} = 1.0$, однако это ведет к существенному

проигрышу при проектировании на режим $\bar{N} = 0.3$ т.к. для удовлетворения ограничения $N_{Ti} = N_{Ti}^{зад}$ на режиме максимальной мощности требуется повысить число сопел Z_c до 5 и увеличить T_{03}^* до 841 К (рис. 2, табл. 2).

Для графиков нагрузок $\bar{\tau}_i = 0.1, 0.8, 0.1$; $\bar{\tau}_i = 0.3, 0.3, 0.4$; $\bar{\tau}_i = 0.45, 0.45, 0.1$, укажем общие характерные результаты. Для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, Z_{ci}, i = 1...3\}$

проектирование на режим максимальной мощности $\bar{N} = 1.0$ приводит к перерасходу подведенной теплоты на режимах с пониженной нагрузкой по сравнению с многорежимной оптимизацией, при этом чем больше доля времени работы на частичном режиме тем больше перерасход (рис. 1). Так для графика нагрузок $\bar{\tau}_i = 0.1, 0.8, 0.1$; $\bar{q}_2 = 2.2\%$, $\bar{\tau}_2 = 0.8$; $\bar{q}_1 = 0.06\%$, $\bar{\tau}_1 = 0.1$; для графика нагрузок $\bar{\tau}_i = 0.45, 0.45, 0.1$; $\bar{q}_1 = 1.1\%$, $\bar{\tau}_1 = 0.45$; $\bar{q}_2 = 1.52\%$, $\bar{\tau}_2 = 0.45$. Увеличение доли режима с максимальной мощностью приводит к снижению влияния режимов с пониженной нагрузкой и снижению перерасхода подведенной теплоты. При $\bar{\tau}_2 = 0.4$ для графика нагрузки $\bar{\tau}_i = 0.3, 0.3, 0.4$

оптимизация на режим $\bar{N} = 1.0$ приводит к перерасходу топлива менее 1% (0.68%). Те же тенденции наблюдаются и для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1...3\}$, однако с меньшим перерасходом подведенной теплоты (рис. 2), что как уже указывалось, связано с отсутствием дополнительной степени свободы ($Z_c \neq var$).

Проектирование на режим $\bar{N} = 0.5$ приводит к значительному перерасходу подведенной теплоты в основном на режиме максимальной мощности и тем больше чем меньше доля времени работы на режиме $\bar{N} = 0.5$ и больше на режиме максимальной нагрузки $\bar{N} = 1.0$ (рис. 1). Так для графиков нагрузок $\bar{\tau}_i = 0.1, 0.8, 0.1$; $\bar{\tau}_i = 0.45, 0.45, 0.1$; $\bar{\tau}_i = 0.3, 0.3, 0.4$ соответственно, $\bar{\tau}_2 = 0.8$, $\bar{q}_3 = 3.71\%$; $\bar{\tau}_2 = 0.45$, $\bar{q}_3 = 4.59\%$; $\bar{\tau}_2 = 0.3$, $\bar{\tau}_3 = 0.4$, $\bar{q}_3 = 13.44\%$ (программа регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, Z_{ci}, i = 1...3\}$). Для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1...3\}$ необходимость выполнения ограничения $N_{T3} = N_{T3}^{зад}$ на режиме максимальной мощности, при проектировании на режим $\bar{N} = 0.5$, для графиков нагрузки с повышенной долей времени работы на режиме $\bar{N} = 0.5$ ($\bar{\tau}_2 = 0.8$ и 0.45) и

пониженной на режиме $\bar{N} = 1.0$ ($\bar{\tau}_3 = 0.1$) приводит к повышению числа сопел Z_c и перерасходу подведенной теплоты даже на режимах $\bar{N} = 0.5$ и $\bar{N} = 0.2$ (рис. 2, табл. 2).

Отметим, что в представленном анализе сравнивались варианты с рациональными (оптимальными) программами регулирования, т.е. по сути, для МРТ спроектированных на i -й режим решалась задача приспособляемости к данному графику нагрузки.

2. Анализ эффективности программ регулирования мощности МРТ

На рис. 3 представлены результаты многорежимной оптимизации МРТ для различных программ регулирования и графиков нагрузок по отношению к результатам многорежимной оптимизации с программой регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$, которые позволяют оценить эффективность применения различных программ регулирования. Как видно применение соплового регулирования в сочетании с $P_{0i}^*, T_{0i}^* = var$ приводит к снижению суммарного количества подведенного тепла в пределах $\bar{Q}_{MO} = 4.62 \dots 10.35$ % в зависимости от графика нагрузки (

$$\bar{Q}_{MO} = \Delta Q_{\Sigma}^{MO} / (Q_{\Sigma}^{PTZ})_{min} = \sum_{i=1}^3 \bar{q}_i^{MO}, \quad \text{где}$$

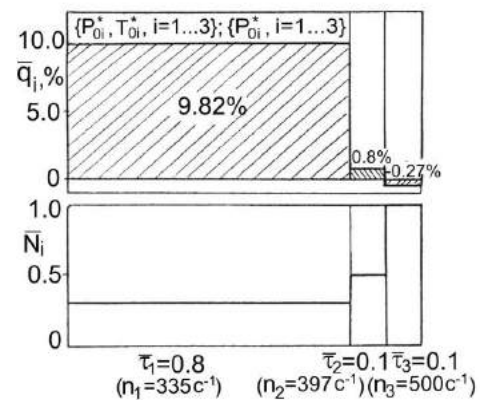
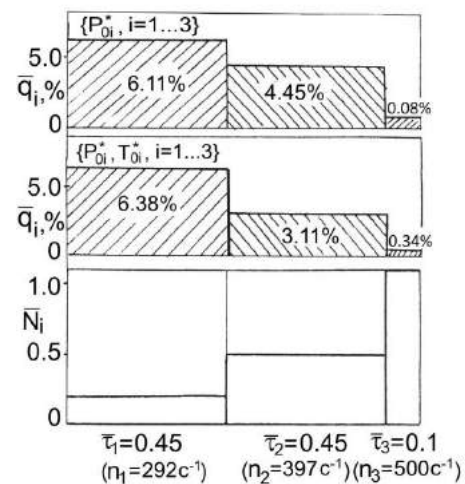
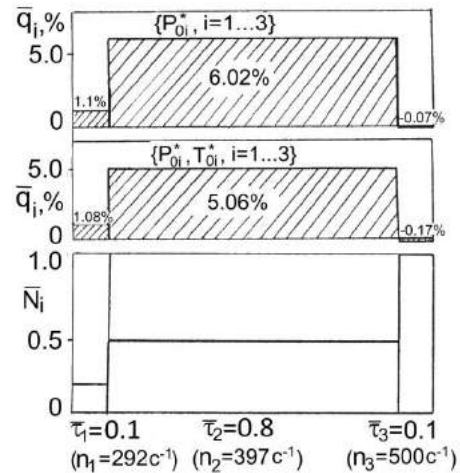
$\Delta Q_{\Sigma}^{MO} = (Q_{\Sigma})_{min} - (Q_{\Sigma}^{PTZ})_{min}$; $(Q_{\Sigma})_{min}$ - минимум для заданного графика нагрузок и программ регулирования отличных от $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$. Причем снижение тем больше, чем меньше суммарная работа $\sum_{i=1}^n \bar{A}_i = \sum_{i=1}^n (\bar{N} \cdot \bar{\tau}_i)$ графика

нагрузок: для графиков нагрузок $\bar{\tau}_i = 0.8, 0.1, 0.1$; $\bar{\tau}_i = 0.45, 0.45, 0.1$; $\bar{\tau}_i = 0.1, 0.8, 0.1$; $\bar{\tau}_i = 0.3, 0.3, 0.4$ соответственно $\bar{A}_{\Sigma} = 0.39, 0.415, 0.52, 0.61$; $\bar{Q}_{MO} = 10.35, 9.84, 5.98, 4.62$ %.

Проведение многорежимной оптимизации для программ регулирования $\{T_{0i}^*, i = 1...3\}$ $\{T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$ показало, что не всегда существует возможность удовлетворения основным ограничениям $N_{Ti} = N_{Ti}^{зад}$ для всех исследуемых графиков нагрузки в пределах заданных ограничений на режимные параметры, что говорит об узком регулировочном диапазоне параметра T_{0i}^* .

Программа регулирования $\{P_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$ оказалась равноэффективной программе $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$ для всех исследуемых графиков нагрузки, что определяется равенством начальных температур для всех режимов $T_{0i}^* = idem$

для программы регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, z_{ci}, i = 1...3\}$ в виду причин описанных выше ($n_{Ti} = f(N_{Ti}^{1/3})$, $U_k \leq 450$ м/с). Тот же результат наблюдается между программами регулирования $\{P_{0i}^*, T_{0i}^*, i = 1...3\}$ и $\{P_{0i}^*, i = 1...3\}$ для графиков нагрузок $\bar{\tau}_i = 0.3, 0.3, 0.4$; $\bar{\tau}_i = 0.8, 0.1, 0.1$.



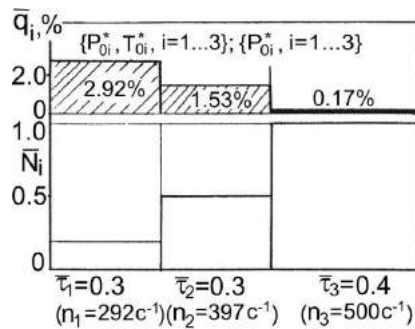


Рис. 3. Сравнение эффективности различных программ регулирования при многорежимной оптимизации МРТ

Заключение

1. Представленные результаты численного эксперимента и проведенный сравнительный анализ показывают целесообразность и перспективность развитого подхода к многорежимной оптимизации [5] и объективность разработанного алгоритма. Можно ожидать, что применение указанного подхода к оптимизации двухвечных сверхзвуковых и

многоступенчатых малорасходных турбин обеспечит еще больший эффект.

2. Из анализа результатов численного моделирования следует:

- поиск оптимального распределения начальных температур T_0^* , давлений P_0^* и числа сопел Z_c по режимам как режимных параметров следует проводить на разных иерархических уровнях: T_0^* - на уровне оптимизации ЭУ, а P_0^* , Z_c - на уровне оптимизации МРТ.

- работа алгоритма приводит к обоснованным с физической точки зрения результатам и позволяет получить рациональную проточную часть для всего графика нагрузок, а также решать задачи приспособляемости.

- применение соплового регулирования в сочетании с $P_{0i}^*, T_{0i}^* = var$ приводит к значительному снижению суммарного количества подведенного тепла по сравнению с другими рассмотренными программами регулирования; снижение расхода топлива тем больше чем ниже суммарная работа графика нагрузок.

Литература

1. Боженов Ю. А., Борков В. М., Гаврилов В.М. и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты. Под общей ред. И.Б. Иванникова. Л.: Судостроение, 1986. 264 с.
2. Дулепов В.И., Лелюх Н.Н., Бабак Л.Н., Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. О применении необитаемых подводных аппаратов для исследования водных экосистем. Подводные технологии. 2005. №1. С. 59-67.
3. Ястребов В. С., Горлов А. А., Симинский В. В. Электроэнергетические установки подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1986. 208 с.
4. Бусурин В.Н., Иванов В.А., Рассохин В.А. Многоцелевые автономные энергетические установки малой мощности. Теплоэнергетика. 1993. №3. С. 65-68.
5. Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Многорежимная оптимизация сверхзвуковых малорасходных турбин в составе энергетических установок автономных подводных аппаратов. Морские интеллектуальные технологии № 3(33) Т.1. 2016. С. 187-193
6. Лапшин К.Л. Многорежимная оптимизация проточных частей осевых тепловых турбин. Теплоэнергетика. 1986. №3. С. 56-57.
7. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей многоступенчатых турбин. СПб.: изд-во СПбГУ, 1992. 196 с.
8. Быков Н.Н., Емин О.Н. Выбор параметров и расчет маломощных турбин для привода агрегатов. М.: Машиностроение, 1972. 228 с.

References

1. Bozhenov Ju. A., Borkov V. M., Gavrilov V.M. i dr. Samohodnye neobitaemye podvodnye apparaty [Self-propelled uninhabited underwater vehicles]. Pod obshhej red. I.B. Ivannikova. L.: Sudostroenie, 1986. 264 s.
2. Dulepov V.I., Leljuh N.N., Babak L.N., Vaulin Ju.V., Shherbatjuk A.F. O primenenii neobitaemyh podvodnyh apparatov dlja issledovaniya vodnyh jekosistem [On the use of uninhabited underwater vehicles for the study of aquatic ecosystems]. Podvodnye tehnologii. 2005. №1. S. 59-67.
3. Jastrebov V. S., Gorlov A. A., Siminskij V. V. Jelektroenergeticheskie ustanovki podvodnyh apparatov [Electric power installations of underwater vehicles]. L.: Sudostroenie, 1986. 208 s.
4. Busurin V.N., Ivanov V.A., Rassohin V.A. Mnogocelevyje avtonomnye jenergeticheskie ustanovki maloj moshhnosti [Multi-purpose autonomous power plants of low power]. Teplojenergetika. 1993. №3. S. 65-68.
5. Simashov R.R., Chehranov S.V. Mnogorezhimnaja optimizacija sverhzhukovyh malorashodnyh turbin v sostave jenergeticheskikh ustanovok avtonomnyh podvodnyh apparatov [Multi-mode optimization of supersonic low-consumption turbines as part of power plants of autonomous underwater vehicles]. Morskie intellektual'nye tehnologii № 3(33) T.1. 2016. S. 187-193
6. Lapshin K.L. Mnogorezhimnaja optimizacija protochnyh chastej osevyh teplovyh turbin [Multi-mode optimization of flow parts of axial heat turbines]. Teplojenergetika. 1986. №3. S. 56-57.
7. Lapshin K.L. Optimizacija protochnyh chastej mnogostupenchatykh turbin [Optimization of flow parts of multi-stage turbines]. SPb.: izd-vo SPbGU, 1992. 196 s.
8. Bykov N.N., Emin O.N. Vybore parametrov i raschet malomoshhnyh turbin dlja privoda agregatov [Selection of parameters and calculation of low-power turbines for the drive of aggregates]. M.: Mashinostroenie, 1972. 228 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рафаиль Равильевич Симашов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), Ass. Prof., Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Сергей Валентинович Чехранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: turboroom@yandex.ru

Sergei V. Chekhranov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

Поступила в редакцию: 06.09.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 621.822.175

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.038>

Анализ результатов численного исследования радиального гибридного лепесткового подшипника с газовой смазкой

Н.В. Куценко¹, e-mail: kutcenko.nv@dvfu.ru М.В. Грибиниченко¹, e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

А.В. Нитяговский¹, nitiagovskii.av@dvfu.ru А.В. Куренский¹, e-mail: kurenskiy.av@dvfu.ru

О.С. Портнова¹, portnova.os@dvfu.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены результаты численного исследования модели радиального гибридного подшипника с газовой смазкой. Установлено наличие оптимальных значений параметров, определяющих форму смазочного зазора, получены их значения и закономерности влияния на них различных характеристик подшипника. Рассмотрено распределение давления в смазочном слое при различном количестве секторов лепестков. Подтверждено предположение о наличии оптимальных значений параметров, определяющих форму смазочного зазора. И опровергнуто предположение о том, что оптимальные значения этих параметров будут зависеть от значений других параметров подшипника.

Выявлен положительный эффект от совместного воздействия газодинамического и газостатического эффектов. Относительно газостатических параметров – выявлен параметр, имеющий оптимальное значение (расстояние от выбранного торца подшипника до линии сетки, на которой располагаются питатели ряда с номером p), которое сохраняет постоянное значение.

На основе полученных результатов разработаны основы методики расчета и оптимизации радиальных гибридных подшипников с газовой смазкой, имеющих профилированную рабочую поверхность.

Ключевые слова: газодинамический, газостатический, гибридный, смазка, газовый подшипник, лепесток, зазор, несущая способность, численный эксперимент.

Numerical analysis of a radial hybrid lobe bearing with gas lubrication

Natalia V. Kutsenko¹, e-mail: kutcenko.nv@dvfu.ru, Matvei V. Gribinichenko¹, gribinichenko.mv@dvfu.ru

Andrey V. Nitiagovskii¹, nitiagovskii.av@dvfu.ru Alexei V. Kurenskiy¹, kurenskiy.av@dvfu.ru,

Olesya S. Portnova¹, portnova.os@dvfu.ru,

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The paper considers the results of numerical study of gas-lubricated hybrid radial bearing model. The presence of optimal values of parameters determining the shape of the lubrication gap is established, their values and regularities of influence of different bearing characteristics on them are obtained. Pressure distribution in the lubricating layer at different number of lobe sectors has been considered. The assumption of optimum values of parameters determining the form of the lubrication gap is confirmed. And the assumption that the optimal values of these parameters will depend on the values of other bearing parameters is refuted.

The positive effect of the combined effect of gas-dynamic and gas-static effects has been revealed. Concerning gas-static parameters - the parameter which has optimum value (distance from the chosen end face of a bearing to a grid line on which feeders of a row with number p are located) which keeps constant value has been revealed.

On the basis of the obtained results the bases of calculation and optimization methodology of radial hybrid bearings with gas lubrication, having profiled working surface, are developed.

Key words: gas-dynamic, gas-static, hybrid, lubrication, gas bearing, foil, air-gap, load-bearing capacity, numerical experiment.

Введение

В настоящее время турбомашин нашли самое широкое применение в различных отраслях техники.

Перспективное развитие турбин на сегодняшний день связано с возможностью увеличения их удельной мощности, путем увеличения частоты вращения роторов. При этом возникает проблема снижения ресурса и надежности подшипников.

Возможное решение этой проблемы заключается в применении опор с газовой смазкой, имеющих, в свою очередь, недостаток - низкую несущую способность смазочного слоя.

Целью исследования является повышение несущей способности радиальных опор с газовой смазкой путем разработки новых конструкций и оптимизации параметров.

По результатам обзора для достижения этой цели поставлены и решаются следующие задачи:

1. Разработать перспективные конструкции радиальных газовых опор, обеспечивающих

повышение несущей способности смазочного слоя по сравнению с существующими конструкциями.

2. Предложить математическую модель объекта исследования.

3. На основе математической модели разработать программу расчета и оптимизации характеристик исследуемых подшипников.

4. Провести численный эксперимент по исследованию свойств исследуемых подшипников.

5. Подтвердить адекватность численных результатов путем сравнения с результатами других авторов, а также при помощи современных программ конечно-элементного анализа.

С результатами решения первой, второй и третьей поставленных задач можно ознакомиться в работах автора [1, 2, 3]. В данной статье речь пойдет о решении четвертой задачи.

1. Численный эксперимент. Общее описание

При проведении численного эксперимента необходимо решить оптимизационную задачу,

направленную на получение максимума несущей способности подшипников исследуемого типа. Решение оптимизационной задачи основывается на изучении влияния комплексных параметров, входящих в математическую модель [1,2], на характеристики подшипника. Целевой функцией является несущая способность, критерием оптимальности - ее максимум, а оптимизируемыми параметрами – комплексы режимных и конструктивных параметров подшипника.

Анализ результатов исследований газовых подшипников различного типа [4,6-9] позволяет сделать несколько предположений относительного исследуемого подшипника:

- некоторые из комплексных параметров подшипника имеют оптимальные значения;
- оптимальные значения параметры подшипника зависят от значения других параметров.

Все комплексные параметры были разделены на несколько групп по определенным признакам: газодинамические, газостатические и общие геометрические параметры.

Результаты численного эксперимента и их анализ приводятся отдельно для каждой такой группы.

2. Газодинамические параметры

К этой группе были отнесены параметры определяющие форму смазочного зазора: относительная протяженность клиновидного участка \bar{L}_{var} , количество клиновидно-равномерных участков ψ , относительная максимальная глубина клиновидного участка $\bar{\delta}_{max}$, а так же число χ [3].

2.1 Величины \bar{L}_{var} , ψ , $\bar{\delta}_{max}$

Эти три величины объединены в единую подгруппу, так как они являются родственными и определяют профиль рабочей поверхности. При их изучении в первую очередь была выяснена целесообразность применения профилирования рабочей поверхности в принципе. Действительно, в случае подтверждения того, что профилирование в любом случае снижает несущую способность смазочного слоя - поиск оптимальных значений теряет смысл.

Т.е. решалась следующая задача. Выполнялся расчет несущей способности подшипника с заданными основными геометрическими параметрами (длиной и радиусом) не имеющего профилирования рабочей поверхности (в программе расчете такой случай задавался в виде приравнивания количества секторов $\psi=0$). Затем для данного подшипника путем профилирования рабочей поверхности (и изменения параметров профилирования) выполнялся поиск более высокого значения несущей способности, чем у подшипника, не имеющего профилирования.

Целесообразность профилирования была доказана. На рис.1 показаны зависимости несущей способности двух подшипников от частоты вращения (профилированного и непрофилированного).

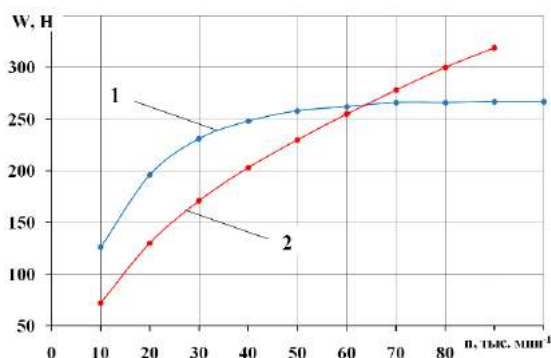


Рис.1 Зависимость несущей способности от частоты вращения непрофилированного и профилированного подшипников: 1- непрофилированный подшипник, 2-профилированный подшипник

На примере рис.1 при частоте свыше 65 тыс мин-1 (рис.1) профилированный подшипник имеет более высокую несущую способность, чем непрофилированный, и данный положительный эффект увеличивается с повышением частоты вращения.

Также следует обратить внимание, что при частоте вращения ниже 65 тыс мин-1 профилирование снижает несущую способность. Таким образом, профилирование при определенных параметрах подшипника может иметь и отрицательный эффект.

2.1.1 Параметр ψ

Численный эксперимент показал, что параметр, определяющий количество секторов ψ имеет одно оптимальное значение.

На рис. 2, и 3 показаны зависимости несущей способности подшипника от количества секторов.

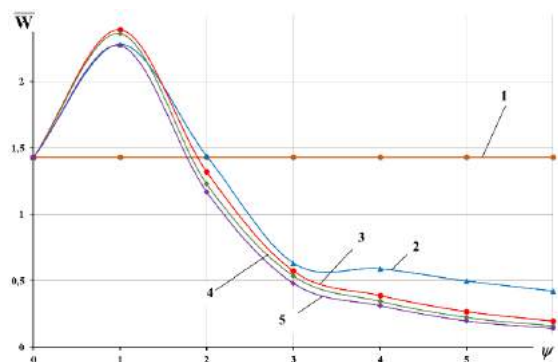


Рис.2 Зависимость коэффициента несущей способности от ψ при различных значениях $\bar{\delta}_{max}$: 1- $\bar{\delta}_{max} = 0$; 2 - $\bar{\delta}_{max} = 1,5$; 3 - $\bar{\delta}_{max} = 2,5$; 4 - $\bar{\delta}_{max} = 4,5$; 5 - $\bar{\delta}_{max} = 4,5$

Кривые строятся от нулевого значения параметра ψ , которое соответствует непрофилированной поверхности подшипника (также случаи непрофилированной поверхности могут задаваться значениями $\bar{L}_{var} = 0$, $\bar{\delta}_{max} = 0$).

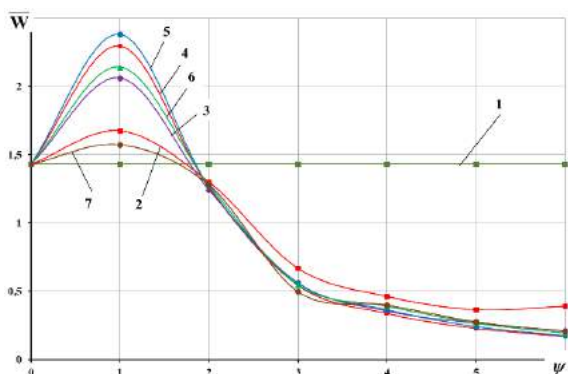


Рис.3 Зависимость коэффициента несущей способности от ψ , при различных значениях: \bar{L}_{var} : 1 – $\bar{L}_{var} = 0$; 2 – $\bar{L}_{var} = 0,1$; 3 – $\bar{L}_{var} = 0,2$; 4 – $\bar{L}_{var} = 0,3$; 5 – $\bar{L}_{var} = 0,4$; 6 – $\bar{L}_{var} = 0,5$; 7 – $\bar{L}_{var} = 0,6$.

Горизонтальные линии 1 на рис. 2 и 3 соответствуют непрофилированному подшипнику.

На рисунках заметен явно выраженный максимум при значении 1 и затем резкое падение несущей способности при дальнейшем увеличении этого параметра, причем уже при значении $\psi = 2$ несущая способность снижается и может стать ниже несущей способности непрофилированного подшипника.

Для того, чтобы объяснить такую зависимость интегральной характеристики (несущей способности) подшипника от формы смазочного зазора, рассмотрим распределение давления в смазочном слое при различном количестве секторов (рис.4). Как указывалось при описании математической модели [1,2] k -е линии откладываются параллельно оси подшипника. Линия с номером $k=0$ проходит через точку с максимальным зазором.

На рис. 4 а показано распределение при одном клиновидно-равномерном секторе.

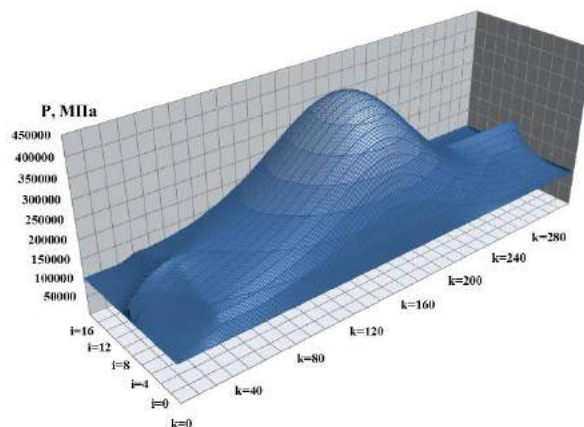
Явно выраженные максимумы давления приходятся на область минимального зазора ($k=200$) и на среднюю часть между краями подшипника ($i=10$). Также на линии $i=10$ (в области максимального зазора от $k=0$ до $k=40$ и от $k=280$ до $k=300$) видны пиковые значения давления, указывающие на проходящую здесь линию наддува. При уменьшении зазора эти пиковые давления скрываются, поскольку здесь начинает проявляться газодинамический эффект.

При четырех секторах (рис.4 б) распределение давления оказывается гораздо менее эффективным. Небольшая протяженность секторов не позволяет получить высокие давления, а увеличение количества границ секторов, на которых давление резко падает, также приводит к отрицательному эффекту с точки зрения формирования несущей способности смазочного слоя.

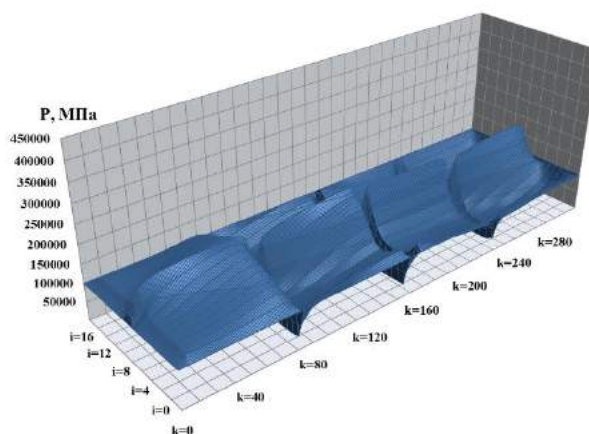
Также можно сделать еще один важный вывод: оптимальное значение параметра ψ не зависит от значений других факторов и всегда остается равным 1.

С учетом этого можно сделать вывод, что рассмотрение случаев, в которых количество секторов не равно 1 не представляет интереса. Но

следует учитывать тот факт, что при решении частных технических задач может возникнуть необходимость в применении большего количества секторов, по крайней мере, двух.



а



б

Рис.4 Распределение давления в смазочном слое при различных количествах секторов: а - $\psi = 1$; б - $\psi = 4$;

2.1.2 Параметр \bar{L}_{var}

Зависимости несущей способности от параметра \bar{L}_{var} при различных значениях параметра сжимаемости χ , количества секторов ψ и максимальной глубины клиновидного участка $\bar{\delta}_{max}$ показаны на рис. 5, 6 и 7.

Анализ этих зависимостей показал, что оптимальное значение этого параметра не подвержено влиянию других параметров и имеет постоянное значение 0,4.

Максимум несущей способности при оптимальном значении ярко выражен. Отмечается значительное влияние параметров ψ и χ на характер этой зависимости. Так ярко выраженный максимум несущей способности наблюдается, когда количество секторов имеет оптимальное значение, а параметр сжимаемости имеет значение выше трех десятков.

В других случаях максимум или неярко выражен, или вообще исчезает.

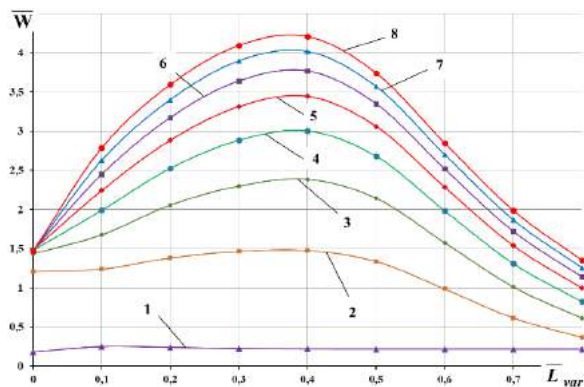


Рис.5 Зависимость коэффициента несущей способности от \bar{L}_{var} при различных значениях χ : 1- $\chi=0$; 2- $\chi=9,0396$; 3- $\chi=18,079$; 4- $\chi=27,119$; 5- $\chi=36,158$; 6- $\chi=45,198$; 7- $\chi=54,238$; 8- $\chi=63,27$.

Влияние параметра $\bar{\delta}_{max}$ (рис. 6) относительно невысокое, качественный характер зависимости и оптимальное значение не изменяется.

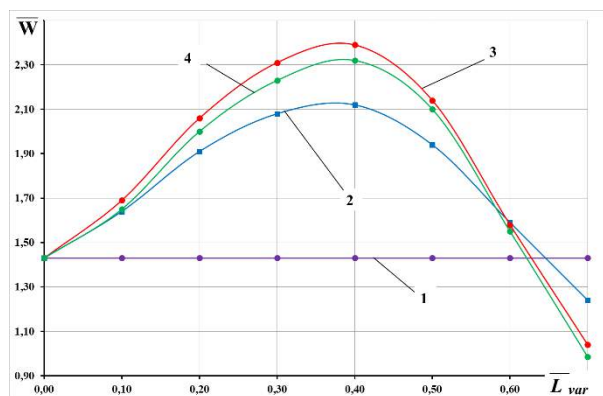


Рис. 6 Зависимость коэффициента несущей способности от \bar{L}_{var} при различных значениях $\bar{\delta}_{max}$: 1 - $\bar{\delta}_{max} = 0$; 2 - $\bar{\delta}_{max} = 1$; 3 - $\bar{\delta}_{max} = 2,5$; 4 - $\bar{\delta}_{max} = 4$.

2.1.3 Параметр $\bar{\delta}_{max}$

Зависимость несущей способности от относительной глубины клиновидного участка $\bar{\delta}_{max}$ (рис. 7 и 8) имеет следующие основные признаки:

- кривые имеют один оптимум, который не зависит от других величин и равен 2,5;
- максимумы менее выражены и отсутствуют для кривых, построенных при не оптимальных значениях параметров, определяющих профиль рабочей поверхности.

Аналогично с зависимостями несущей способности от \bar{L}_{var} (см. выше) характер рассматриваемых кривых значительно зависит от количества секторов. На рис. 8 видно, что при $\psi=1$ значения несущей способности выше, чем у не профилированного подшипника.

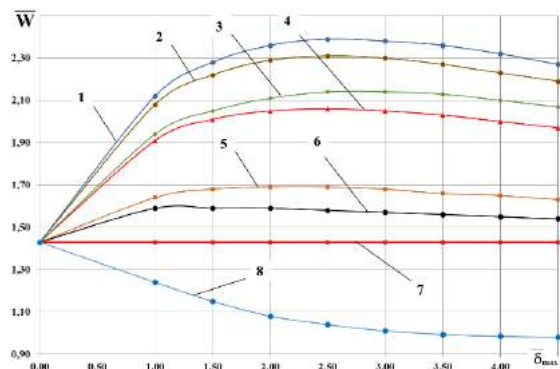


Рис.7 Зависимость коэффициента несущей способности от $\bar{\delta}_{max}$ при различных значениях \bar{L}_{var} : 1 - $\bar{L}_{var} = 0,4$ 2 - $\bar{L}_{var} = 0,3$; 3- $\bar{L}_{var} = 0,5$; 4 - $\bar{L}_{var} = 0,2$; 5 - $\bar{L}_{var} = 0,1$; 6 - $\bar{L}_{var} = 0,6$; 7 - $\bar{L}_{var} = 0$; 8 - $\bar{L}_{var} = 0,7$.

В большинстве других случаев кривые лежат ниже линии 2, соответствующей непрофилированному подшипнику, не имеют максимумов и в целом показывают на отрицательное влияние профилирования поверхности.

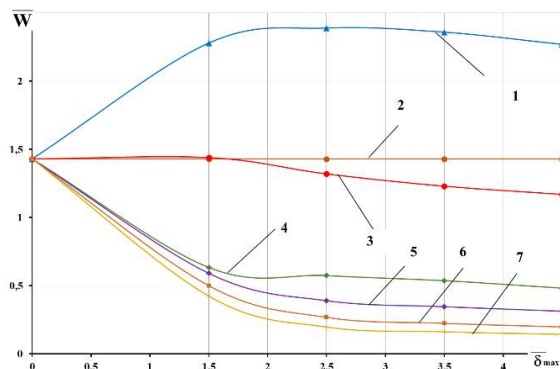


Рис. 8 Зависимость коэффициента несущей способности от $\bar{\delta}_{max}$ при различных значениях ψ : 1- $\psi=1$; 2- $\psi=0$; 3- $\psi=2$; 4- $\psi=3$; 5- $\psi=4$; 6- $\psi=5$; 7- $\psi=6$;

2.2 Параметр χ

На рис.9 показана зависимости коэффициента несущей способности от параметра сжимаемости при различных значениях относительной длины клиновидного участка.

С увеличением числа χ наблюдается рост коэффициента несущей способности, который не является линейным, а постепенно снижается, явно приближаясь к некоторой асимптоте.

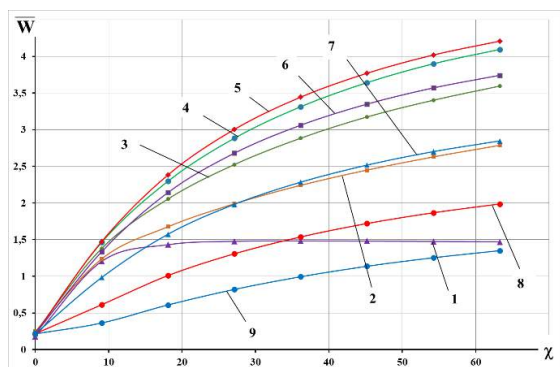


Рис. 9 Зависимость коэффициента несущей способности от числа χ при различных значениях \bar{L}_{var} :
 1 – $\bar{L}_{var} = 0$; 2 – $\bar{L}_{var} = 0,1$; 3 – $\bar{L}_{var} = 0,2$; 4 – $\bar{L}_{var} = 0,3$
 5 – $\bar{L}_{var} = 0,4$; 6 – $\bar{L}_{var} = 0,5$; 7 – $\bar{L}_{var} = 0,6$; 8 – $\bar{L}_{var} = 0,7$; 9 – $\bar{L}_{var} = 0,8$.

Большой интерес представляет зависимость несущей способности подшипника от параметра сжимаемости при различных значениях параметра ψ (см. рис. 10). Здесь наблюдается явное (и значительное) изменение характера зависимости при различных значениях ψ .

Для непрофилированного подшипника ($\psi = 0$) зависимость достаточно быстро приближается к некоторой асимптоте, и далее кривая сохраняет практически постоянное значение функции.

При количестве секторов $\psi = 1$ наблюдается наиболее эффективный рост зависимости с наиболее высокими значениями несущей способности. Дальнейшее увеличение количества секторов приводит к резкому снижению значений несущей способности.

Следует обратить внимание на кривую 3 соответствующую подшипнику с $\psi = 2$ (рис. 10). В целом такой подшипник показывает меньшую эффективность, чем подшипник с $\psi = 1$. Но он имеет и особенность, заключающуюся в том, что при достижении определенного значения числа χ его несущая способность начинает превышать несущую способность непрофилированного подшипника.

Этот факт может представлять интерес так как в определенных случаях может возникнуть необходимость применения профиля с количеством секторов больше оптимального значения равного 1 (например $\psi = 2$).

Из рис. 10 видно, что дальнейшее увеличение количества секторов (более двух) в любом случае оказывает значительное негативное влияние на зависимость несущей способности от параметра сжимаемости и применение таких профилей должно иметь веское обоснование.

Также при численном исследовании зависимости несущей способности от числа χ был выявлен некоторый положительный эффект от совместного воздействия газодинамического и газостатического эффектов.

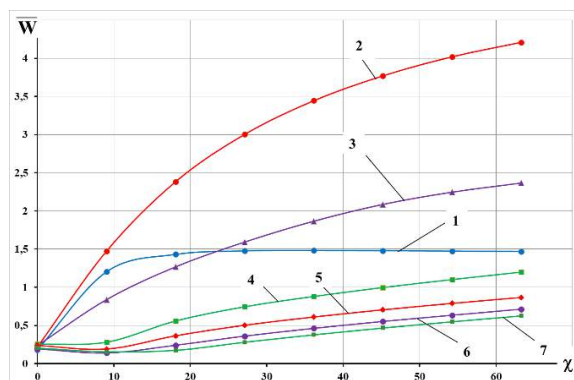


Рис. 10 Зависимость коэффициента несущей способности от числа χ при различных значениях ψ :
 1- $\psi=0$; 2- $\psi=1$; 3- $\psi=2$; 4- $\psi=3$; 5- $\psi=4$; 6- $\psi=5$; 7- $\psi=6$.

3. Газостатические параметры

Ко второй группе отнесены: расстояние от торца подшипника до линии сетки с питателями \bar{l}_p , параметр A , относительный диаметр питателя \bar{d}_n , относительное давление наддува \bar{P}_S [2,3]. Эти величины определяют характер проявления и степень влияния на несущую способность газостатического эффекта.

Данные комплексы включают параметры, характеризующие конструктивные особенности подачи газа в смазочный зазор: диаметр и количество питателей, расположение питателей относительно торца подшипника, а также параметры газа: давление, температура, вязкость и его вид (удельная газовая постоянная). В итоге, как было сказано выше, эти величины определяют характер проявления и степень влияния на несущую способность газостатического эффекта.

Численное исследование зависимости несущей способности от \bar{l}_p при изменении других параметров подшипника показало, что этот параметр (единственный из всех параметров 2-й группы) имеет оптимальное значение, при этом на него не оказывает влияние значения других режимных или конструктивных параметров. Значение \bar{l}_p неизменно и равно 0,35.

Для примера на рис. 11 показана зависимость несущей способности от \bar{l}_p при различных значениях \bar{L}_{var} .

3.1 Относительное давление наддува \bar{P}_S

Зависимость несущей способности от данного параметра в исследуемом диапазоне значений возрастает практически линейно. Некоторый интерес представляет влияние данного параметра на зависимость несущей способности от числа χ , (см. рис. 9).

4. Общие геометрические параметры

К третьей группе отнесем следующие параметры: относительная длина подшипника λ и относительный эксцентриситет \bar{e} .

Величины, входящие в данную группу, являются геометрическими, оптимальных значений не имеют, значительного влияния на оптимальные значения параметров определяющих профиль рабочей поверхности не выявлено.

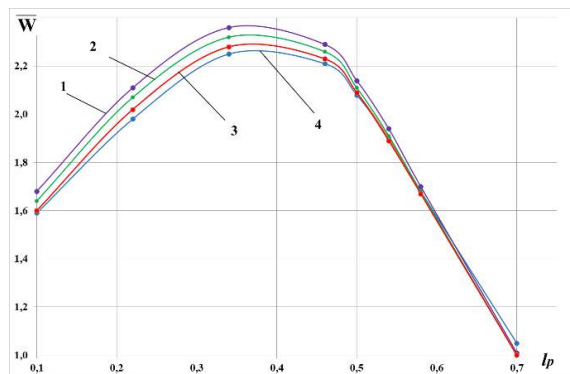


Рис. 11 Зависимость несущей способности от параметра \bar{l}_p при различных значениях \bar{L}_{var} :
 1 – $\bar{L}_{var} = 0,5$; 2 – $\bar{L}_{var} = 0,3$; 3 – $\bar{L}_{var} = 0,8$; 4 – $\bar{L}_{var} = 0,1$.

Заключение

На основании результатов численного эксперимента были определены комплексы и параметры, которые имеют оптимальные значения. Как и предполагалось к ним относятся величины, определяющие клиновидный профиль рабочей поверхности, а также величина, определяющая положение питателей относительно границ подшипника.

Результаты численного исследования подтвердили некоторые первоначально сделанные предположения, в то время как другие были опровергнуты.

В частности, было подтверждено предположение о наличии оптимальных значений параметров, определяющих форму смазочного зазора. В тоже время практически полностью было опровергнуто предположение о том, что оптимальные значения этих параметров будут зависеть от значений других параметров подшипника.

Литература

1. Куценко Н.В., Грибиниченко М.В. Численный эксперимент по исследованию свойств радиального гибридного лепесткового подшипника с газовой смазкой для судовых турбомашин // Труды Крыловского государственного научного центра. - 2018. - №20181. – С.157 – 162
2. Грибиниченко М.В., Куренский А.В., Куценко Н.В., Gladkova N.A. Расчетная схема радиального лепесткового гибридного подшипника // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. - № 3(25). – С. 30 – 35.
3. Грибиниченко М.В., Куценко Н.В., Нитяговский А.В. Методика расчета радиального гибридного лепесткового подшипника с газовой смазкой высокоскоростных агрегатов судовой энергетики // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. 2017. № 2 (2). С. 361-366.
4. Зенкина И.А. Главный момент сил сопротивления в газодинамическом подшипнике со спиральными канавками // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона.» – 2014. – №3. – С. 197–210.
5. Бесчастных В.Н., Равикович Ю.А., Соколов А.Н. Определение статической грузоподъемности сегментного газостатического подшипника // Вестник МАИ. – 2009. - №1. – С.84-94
6. Булат М.П., Продан Н.В. Оптимизация сегментного гибридного газостатического подшипника // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. - 2015. - №8-3. – С.15-22.
7. Самсонов, А. И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин: монография / А. И. Самсонов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 292с.
8. Грибиниченко М.В. Осевые гибридные подшипники с газовой смазкой для турбокомпрессоров наддува судовых ДВС.: Дис... канд.техн.наук. Владивосток., ДВГТУ, 2006. – 133с.
9. Куренский А.В. Повышение несущей способности осевых гибридных лепестковых подшипников на газовой смазке судовых турбомашин.: Дис... канд. техн. наук. Владивосток., ДВГТУ, 2012. – 168с.

References

1. Kucenko N.V., Gribinichenko M.V. Chislennyj eksperiment po issledovaniyu svojstv radial'nogo gibridnogo lepestkovogo podshpivnika s gazovoj smazkoj dlya sudovyh turbomashin [Numerical experiment to study the properties of a gas-lubricated radial hybrid foil bearing for marine turbomachinery]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2018. №20181. S. 157 – 162.
2. Gribinichenko M.V., Kurenskiy A.V., Kucenko N.V., Gladkova N.A. Raschetnaya skhema radial'nogo lepestkovogo gibridnogo podshpivnika [Calculation scheme of radial foil hybrid bearing]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2014. № 3(25). S. 30 – 35.
3. Gribinichenko M.V., Kucenko N.V., Nityagovskij A.V. Metodika rascheta radial'nogo gibridnogo lepestkovogo podshpivnika s gazovoj smazkoj vysokoskorostnyh agregatov sudovoj energetiki [Calculation procedure for a radial hybrid lobe bearing with gas lubrication of high-speed power units]. Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady nauchno-prakticheskoj konferencii. 2017. № 2 (2). S. 361-366.
4. Zenkina I.A. Glavnij moment sil soprotivleniya v gazodinamicheskom podshpivnike so spiral'nymi kanavkami [Main moment of drag forces in gas-dynamic bearing with spiral grooves]. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Inzhenernyj vestnik Dona.», 2014., №3., S. 197–210.

5. Beschastnyh, V.N., YU.A. Ravikovich, A.N. Sokolov Opredelenie staticheskoy gruzopod"emnosti segmentnogo gazostaticheskogo podshipnika [Determination of the static load-carrying capacity of a segmented gas-static bearing]. Vestnik MAI. 2009. №1. S.84-94
6. Bulat M.P., Prodan N.V Optimizaciya segmentnogo gibridnogo gazostaticheskogo podshipnika [Optimization of a segmented hybrid gas-static bearing]. Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoj nauki. 2015. №8-3. S.15-22.
7. Samsonov, A. I. Podshipniki s gazovoj smazkoj dlya turbomashin [Gas lubricated bearings for turbomachinery]: monografiya. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2009. 292s.
8. Gribinichenko M.V. Osevye gibridnye podshipniki s gazovoj smazkoj dlya turbokompressorov nadduva sudovyh DVS [Gas-lubricated hybrid axial bearings for turbochargers for superchargers in marine engines]. Dis... kand.tekhn.nauk. Vladivostok., DVG TU, 2006. 133s.
9. Kurenskiy A.V. Povyshenie nesushchej sposobnosti osevyh gibridnyh lepestkovyh podshipnikov na gazovoj smazke sudovyh turbomashin [Increasing the bearing capacity of axial hybrid lobe bearings on gas lubricated ship turbomachinery]. Dis... kand. tekhn. nauk. Vladivostok., DVG TU, 2012. 168s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Наталья Владимировна Куценко старший преподаватель отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: kutcenko.nv@dvfu.ru

Natalia V. Kutsenko Senior lector of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: kutcenko.nv@dvfu.ru

Матвей Валерьевич Грибиниченко кандидат технических наук, доцент, директор отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

Matvei V. Gribinichenko Candidate of Science Engineering, Assistant professor, Chief of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

Андрей Валерьевич Нитяговский аспирант отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: nitiagovskii.av@dvfu.ru

Andrey V. Nitiagovskii postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: nitiagovskii.av@dvfu.ru

Алексей Владимирович Куренский кандидат технических наук, доцент отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: kurenskiy.av@dvfu.ru

Alexei V. Kurenskiy Candidate of Science Engineering, Assistant professor of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: kurenskiy.av@dvfu.ru,

Олеся Сергеевна Портнова старший преподаватель отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: portnova.os@dvfu.ru

Olesya S. Portnova Senior lector of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transportation, Far Eastern Federal University, Ajax village, 10, i. Russian, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russian Federation, e-mail: portnova.os@dvfu.ru,

Поступила в редакцию: 20.07.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

Оценка теплового рассеивания элементов судовых технических средств морских судов

В.В. Герасиди¹, e-mail: gerasidi@rambler.ru **А.В. Лисаченко**¹, e-mail: alexx.liss@yandex.ru,
Н.И. Николаев¹, e-mail: gmluft@kbinov.ru, **А.Е. Слисан**², e-mail: slicanae@gumrf.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, ²Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова

Аннотация: статья посвящена экспериментальному исследованию и оценке теплового рассеивания элементов судовых технических средств при помощи тепловизора: силиконового демпфера и водоводяного охладителя высокооборотного двигателя, дейдвудного подшипника. Для дейдвудного подшипника представлены также вибрационные параметры контроля. Применяемые в экспериментальных исследованиях переносные приборы неразрушающего контроля допущены к применению в РФ, проходят систематическую поверку и калибровку. Результаты экспериментальных исследований показывают, что при накоплении статистических данных по оценке теплового рассеивания судовых технических средств можно разработать рекомендации по нормированию и прогнозированию их состояния. Полученные экспериментальные данные могут быть предметом рассмотрения Классификационным обществом для улучшения качества наблюдения за технической эксплуатацией судовых технических средств. Доказано, что применение такого метода позволяет определить температурное распределение в судовых технических средствах с учетом режимов эксплуатации пропульсивного комплекса и дополнить представление о техническом состоянии сочетания с другими методами контроля для оценки и прогнозирования технического состояния судовых технических средств. Накопленный опыт в проведении экспериментальных исследований контроля технического состояния безразборным методом диагностики позволит перейти от классических подходов технической эксплуатации до новых, входящих в систему удаленного контроля и управления судовых технических средств автономных судов в эксплуатации.

Ключевые слова: тепловизор, высокооборотный двигатель, силиконовый демпфер, дейдвудный подшипник, тепловое рассеивание.

Assessment of thermal dispersion of elements of ship technical means of sea vessels

Viktor V. Gerasidi¹, e-mail: gerasidi@rambler.ru, **Alexey V. Lisachenko**¹, e-mail: alexx.liss@yandex.ru,
Nikolai I. Nikolaev¹, e-mail: gmluft@kbinov.ru, **Andrey E. Slitsan**², e-mail: slicanae@gumrf.ru

¹Admiral Ushakov State Maritime University, ²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Abstract. the article is devoted to the experimental study and evaluation of the thermal dispersion of elements of ship technical means using a thermal imager: a silicone damper and a water-water cooler of a high-speed engine, a deadwood bearing. For the deadwood bearing, the vibration control parameters are also presented. Portable non-destructive testing devices used in experimental studies are approved for use in the Russian Federation, undergo systematic verification and calibration. The results of experimental studies show that with the accumulation of statistical data on the assessment of the thermal dissipation of ship technical equipment, it is possible to develop recommendations for rationing and forecasting their condition. The experimental data obtained can be the subject of consideration by the Classification Society for improving the quality of monitoring the technical operation of ship technical equipment. It is proved that the use of such a method allows us to determine the temperature distribution in ship technical means, taking into account the operating modes of the propulsive complex, and to supplement the idea of the technical condition of the combination with other control methods for assessing and predicting the technical condition of ship technical means

The accumulated experience in conducting experimental studies of technical condition monitoring by the non-disassembled diagnostic method will allow us to move from classical approaches of technical operation to new ones included in the system of remote control and management of ship technical means of autonomous vessels in operation

Keywords: thermal imager, high-speed motor, silicone damper, deadwood bearing, thermal dissipation.

Введение

На современных морских судах широко применяется пропульсивный комплекс каждый из которых состоит из дизель-редукторной передачи, валопровода, дейдвудного устройства с подшипниками на масляной смазке и винта (рисунок 1). В качестве главных двигателей устанавливаются высокооборотные двигатели (ВОД) фирмы "Caterpillar" [1]. Для оценки технического состояния (ТС) судовых технических средств (СТС) рекомендованы и предусмотрены в документах Российского Морского Регистра судоходства (РМРС), международных и российских стандартах следующие виды контроля [2-8]:

- визуальный
- параметрический;
- трибологический;
- вибрационный;
- тепловое рассеивание.

В различных литературных источниках приводятся многочисленные результаты оценки ТС СТС с использованием всех перечисленных выше видов контроля кроме теплового рассеивания.

Цель: оценка теплового рассеивания элементов СТС пропульсивного комплекса морских судов (рисунок 1) с использованием тепловизора:

- дейдвудный подшипник;

– водоводяной охладитель и силиконовый демпфер (СД) ВОД "Caterpillar" серии 3500.

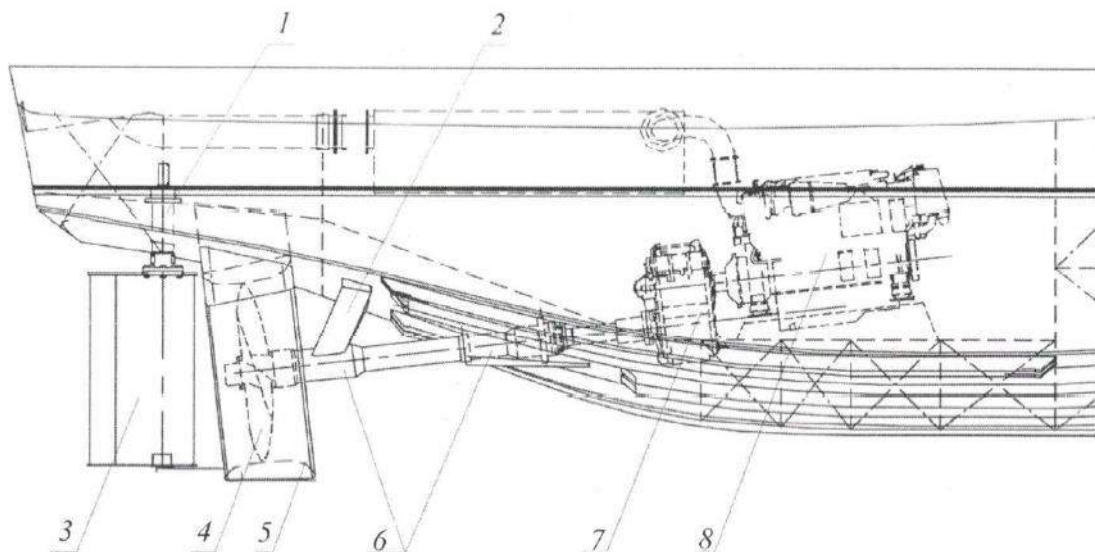


Рис. 1. Пропульсивный комплекс с подвесным дейдвудным устройством проектов 2608 и 1907 Damen stan tug
1 – баллер; 2 – кронштейн валопровода; 3 – перо руля; 4– винт; 5 – насадка; 6 – дейдвудная труба с подшипниками; 7 – редуктор; 8 – главный двигатель

Условия проведения измерений

На ходу судна, движение прямолинейное.

Состояние моря: спокойное, волнение 1 – 2 балла.

Режим работы ГД: I – 1100 мин-1, II – 1300 мин-1, III – 1500 мин-1.

Двигатели и редуктор прогреты до рабочей температуры.

Средства контроля ТС СТС

1. Термограммы были выполнены тепловизором фирмы «Testo 872» «Besu Testo» (Германия), серийный номер 62090154 (рисунок 2).

2. Анализатор шума и вибрации типа «SVAN 958» «Svantek Ltd» (Польша) зав. № 35031 с датчиком вибрации типа SV85 зав. № D1198. (рисунок 3).

Методика измерения и создания ИК-изображения включает следующие действия: выбор правильной области измерения; настройка оптимальной фокусировки ИК-изображения на участке, соответствующем области измерений; выбор соответствующей цветовой палитры (например, "iron" (железо), "rain bow" (радуга) и т.д.). В нашем случае была выбрана цветовая палитра – «радуга»; изменение настройки коэффициента излучения и компенсации отраженной температуры (КОТ) в соответствии с материалом объекта измерения. (Выставляем где-то 0.93-0.95);

Условия выполнения работы

В начале двигателя прогрели и др. элементы пропульсивного комплекса до рабочих температур и постепенно вывели на характерный ходовой режим работы буксира, соответствующий частоте вращения коленчатого вала главных двигателей 1100 мин⁻¹.

Замеры сначала проводили на работающем двигателе, а затем на остановленном двигателе

судна у причала. Обработка результатов выполнялась через специальную программу testo IR Soft.

Все приборы допущены к применению в РФ, проходят систематическую поверку и калибровку.



Рис. 2. Фото анализатор шума и вибрации типа «SVAN 958» «SvantekLtd»



Рис.к 3. Фото тепловизора Testo 872

Дейдвудный подшипник

Контроль ТС дейдвудных подшипников валопроводов морского судна был вызван техническим персоналом судна в связи, по их мнению, с повышенной вибрацией. Из всех перечисленных выше контролей ТС в данном случае подходит вибрационный и тепловое рассеивание.

Результаты вибрационного контроля приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что уровни вибрации на обоих подшипниках примерно одинаковые и не превышают рекомендованных норм. В связи с этим нами было принято решение оценке ТС подшипников с применением тепловизора.

Таблица 1

Результаты проведенного вибрационного контроля.

Дейдвудный подшипник валопровода левого борта			
Среднегеометрические частоты характерных 1/3 октавных полос			
	1 режим работы ГД, (n _{ГД} = 1100 мин ⁻¹)	2 режим работы ГД, (n _{ГД} = 1300 мин ⁻¹)	3 режим работы ГД, (n _{ГД} = 1500 мин ⁻¹)
	(0.5-1)n / 2 – 6Гц	(0.5-1)n 2 – 6Гц	(0.5-1)n 2 – 6Гц
Точки	Виброскоростьv, мм/с		
1Y	0.46	1.1	0.22
1Z	0.28	0.32	0.14
Из опыта замеров параметров вибрации дейдвудного устройства значения виброскорости не более 1.8 мм/с[1]			
СКЗ в диапазоне частот 1 – 200 Hz			
Точки	Виброскоростьv, мм/с		
1Y	0,54	0,91	0,48
1Z	0,65	0,52	0,56
Из опыта замеров параметров вибрации дейдвудного устройства значения виброскорости не более 5 мм/с[2]			
Дейдвудный подшипник валопровода правого борта			
Среднегеометрические частоты характерных 1/3 октавных полос			
	1 режим работы ГД, (n _{ГД} = 1100 мин ⁻¹)	2 режим работы ГД, (n _{ГД} = 1300 мин ⁻¹)	3 режим работы ГД, (n _{ГД} = 1500 мин ⁻¹)
	(0.5-1)n 2 – 6Гц	(0.5-1)n 2 – 6Гц	(0.5-1)n 2 – 6Гц
Точки	Виброскоростьv, мм/с		
1Y	0.32	0.71	0.28
1Z	0.18	0.24	0.29
Из опыта замеров параметров вибрации дейдвудного устройства значения виброскорости не более 1.8 мм/с[1]			
СКЗ в диапазоне частот 1 – 200 Hz			
Точки	Виброскоростьv, мм/с		
1Y	0,72	1,35	0,4
1Z	0,78	0,78	0,79
Из опыта замеров параметров вибрации дейдвудного устройства значения виброскорости не более 5 мм/с[2]			

На рисунке 4 приведены термограммы дейдвудного подшипника валопроводов левого и правого бортов морского судна. Полученные термограммы дейдвудных подшипников показали, что температура подшипника левого борта составляет 32 °С, а правого 18 °С. Разница температур в 14 °С. Это может свидетельствовать о необходимости проверки затяжки уплотнения, центровки валопроводов и количества смазки. Такое сравнение результатов двух видов контроля ТС (вибрационного и теплового состояния) дейдвудных подшипников показала в данном примере, что применение теплового контроля наглядно показано

свою эффективность. В документах Классификационных обществ [2], регламентируются процедура продления эксплуатации дейдвудных устройств на масляной (водяной) смазке без выемки гребных валов до 15 лет: положения по внедрению и поддержанию системы контроля состояния валопровода.

По нашему мнению полученные результаты (смотри рисунок 4) в случае накопления таких данных могут быть предметом рассмотрения Классификационным обществом для улучшения качества наблюдения за технической эксплуатацией СТС.

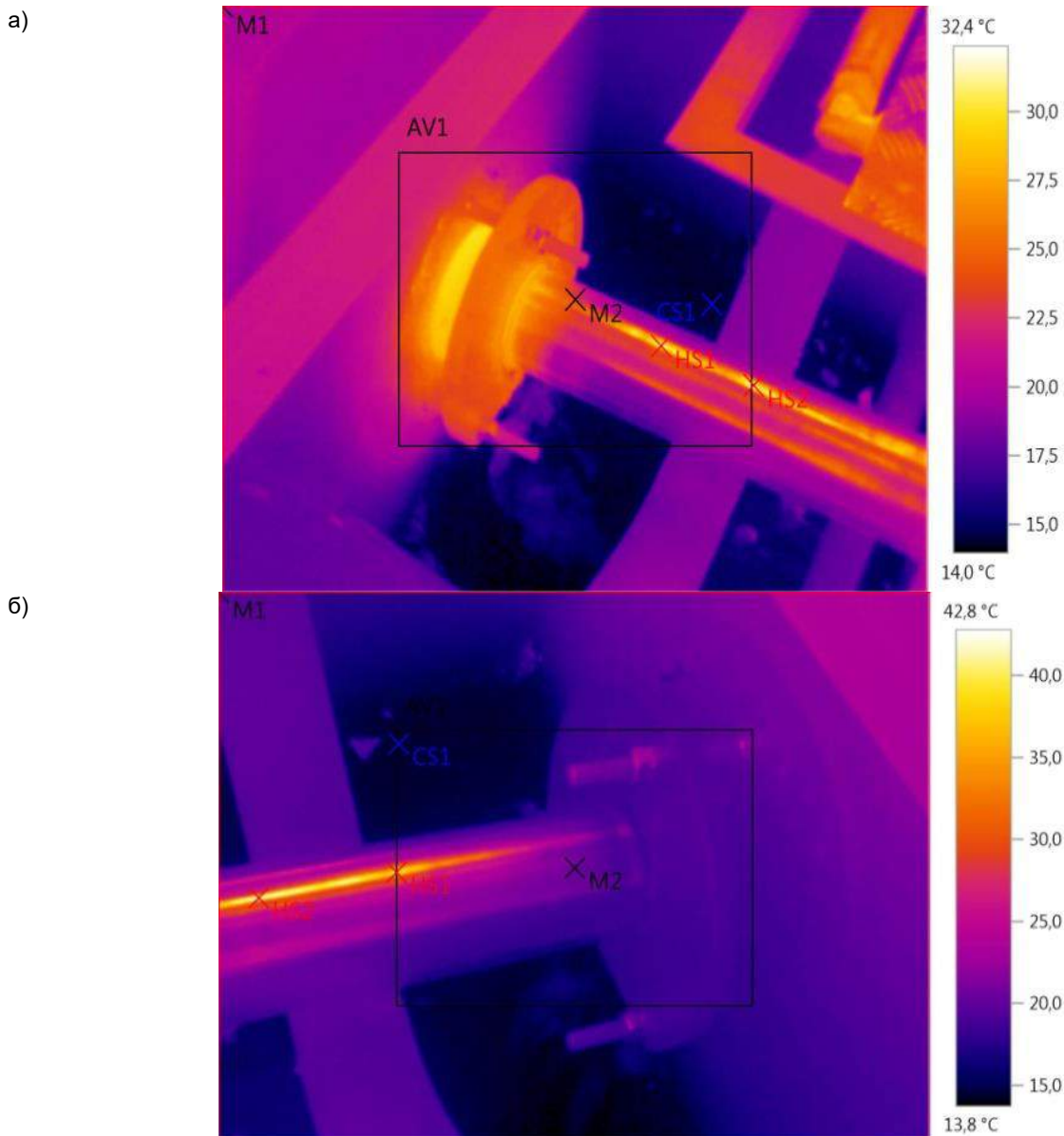


Рис. 4. Термограмма действующего подшипника валопровода
а) левого борта; б) правого борта

Силиконовый демпфер и водоводяной охладитель ВОД "Caterpillar"

Контроль теплового состояния СД крутильный колебаний двигателя САТ серии 3500 с помощью современного телевизора позволит определить:

- разность температур между двигателем и демпфером;
- изображение распределения температур в демпфере и водяном охладителе.

На рисунке 5 показаны термограммы СД на работающем и остановленном двигателях с

указанием температуры вдоль линии от центра к периферии демпфера и температурный профиль с максимальной, минимальной и средней температурами.

На рисунках 5б хорошо видно равномерное распределение температур, максимальное значение составило 89.8, минимальное- 43.6 и среднее значение-56.7 градусов.

На рисунке 5в максимальное значение-85.7, минимальное-46.9, среднее- 59.5 градусов.

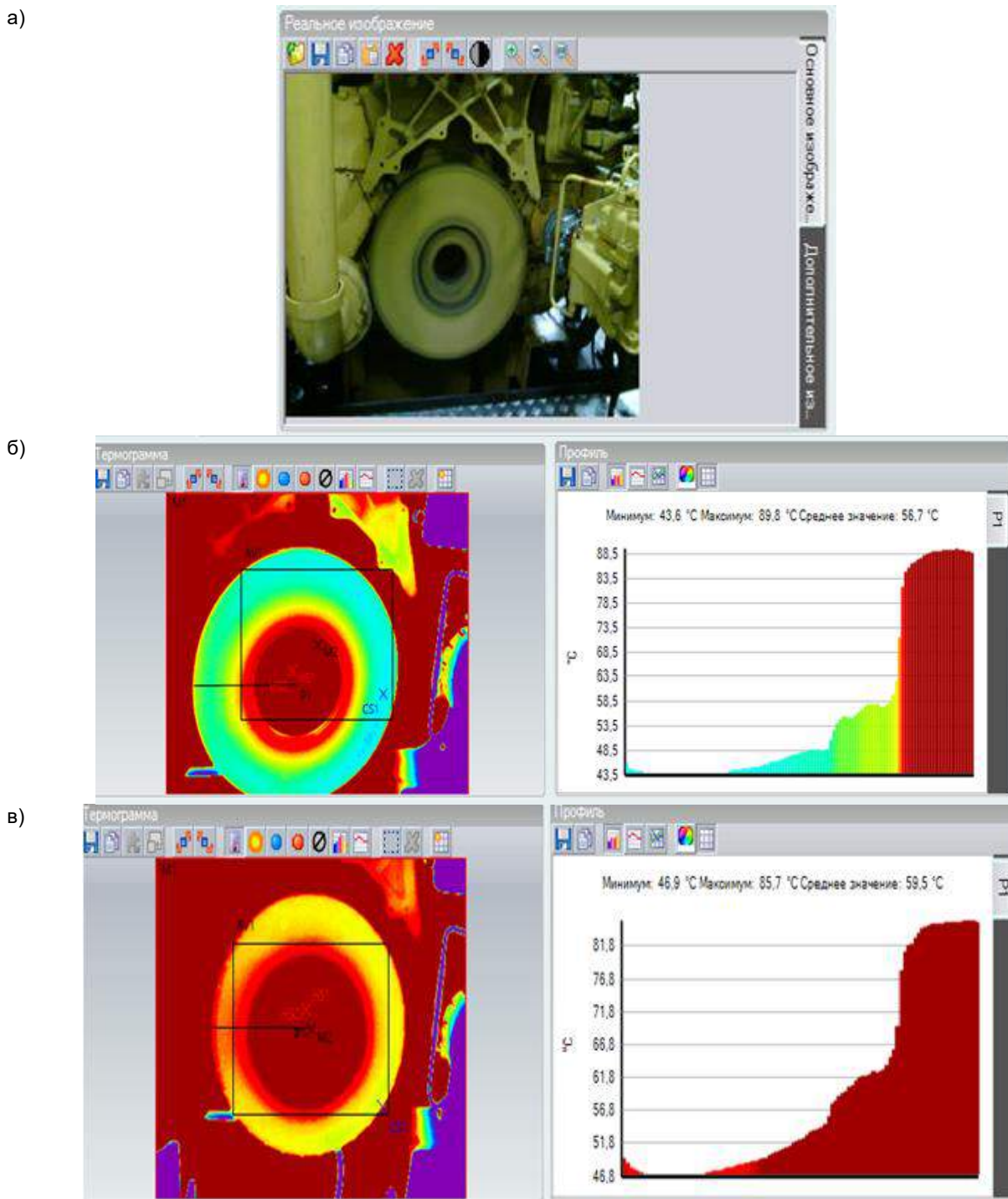


Рис. 5. Термограмма силиконового демпфера двигателя CAT серии 3500
 а) фото демпфера б) на работающем двигателе; в) на остановленном двигателе

Диапазон температурной шкалы был задан от 40 до 50 градусов, что позволило увидеть изменения в температуре между двумя режимами.

По полученным термограммам можно делать вывод, что температура демпфера и соседней с ним детали находится в допустимом диапазоне [7]. Также можно судить о том, что температура в самом демпфере не превышает максимальной температуры, установленной заводом-изготовителем - 75 °C.

На работающем двигателе происходит равномерное распределение температуры в демпфере, а при остановленном двигателе наблюдается кольцевой температурный спектр как раз в области, где находится подвижное кольцо демпфера (рисунок 5,б).

На рисунке 6, в качестве примера, приводится термограмма распределения горячей и холодной воды в водоводяном охладителе ВОД "Caterpillar"

серии 3500 во время теплотехнических испытаний горячая среда 87,3 °С, холодная – 21 °С.

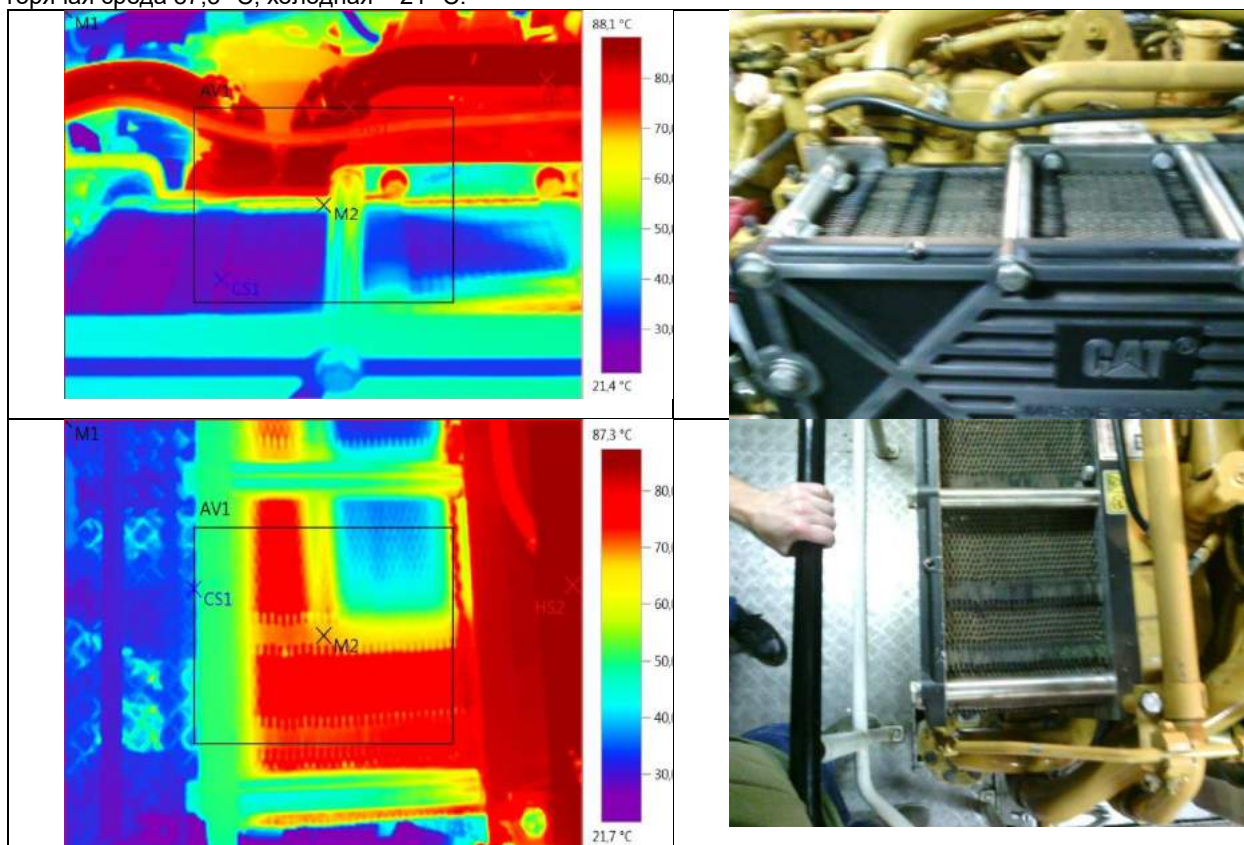


Рис. 6. Термограммы водоводяного охладителя ВОД фирмы "Caterpillar" C32 при нагрузке 66 % от $N_{e,ном}$ во время теплотехнических испытаний
а) распределение холодной среды в теплообменнике б) распределение горячей среды в теплообменнике

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования по оценке теплового рассеивания элементов судовых технических средств морских судов с помощью современных тепловизоров показали, что:

1. Применение такого метода позволяет определить, температурное распределение в СТС с

учетом режимов эксплуатации пропульсивного комплекса и дополнить представление о техническом состоянии СТС сочетания с другими методами контроля ТС.

2. При накоплении статистических данных по оценке теплового рассеивания СТС можно разработать рекомендации по нормированию их состояния.

Литература

1. Регистровая книга судов Российского морского регистра судоходства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rs-class.org/ru/regbook/> (дата обращения 09.09.2021).
2. Правила постройки и классификация судов ЧАСТЬ VII. Механические установки. НД № 2-020101-138. Санкт-Петербург. 2021 г.
3. Приложения к Руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД № 2-030101-009.РМРС. Санкт-Петербург. 2021 г.
4. Чернов С.Е. Методика оценки работоспособности силиконовых демпферов крутильных колебаний судовых дизелей. СПб. Журнал «Судостроение». 2000 г.
5. Худяков С.А. Усталостная прочность деталей валопровода танкеров проекта 1577. Вестник ГМУ им. Ф.Ф.Ушакова. Новороссийск. 2019 г.
6. Руководство Р.043-2016 «Оценка работоспособности силиконовых демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания», Российский Речной Регистр-Москва, 2016.
7. ГОСТ Р 56646-2015/ISO/TR 19201:2013 «Вибрация. Руководство по выбору критериев оценки вибрационного состояния машин». Дата введения 2016-12-01
8. ГОСТ Р ИСО 3046-5-2004 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 5. Крутильные колебания». Дата введения 2005-01-01.

References

1. Rossijskij morskoy registr sudohodstva [Russian Maritime Register of Shipping]. Registrovaya kniga. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://lk.rs-class.org/regbook/regbookVessel>
2. Pravila postrojki i klassifikacija sudov ChAST" VII. Mehanicheskie ustanovki [Rules for classification and construction of sea vessels. Part VII. Mechanical installations]. ND № 2-020101-138. Sankt-Peterburg. 2021 g.
3. Prilozhenija k Rukovodstvu po tehničeskomu nabljudeniju za sudami v jekspluatacii [Appendices to the Manual on technical supervision of Ships in operation]. ND № 2-030101-009.RMRS.Sankt-Peterburg. 2021 g.
4. Chernov S.E. Metodika ocenki rabotosposobnosti silikonovyh dempferov krutil'nyh kolebanij sudovyh dizelej [Methodology for evaluating the performance of silicone dampers of torsional vibrations of marine diesel engines]. SPb. Zhurnal «Sudostroenie». 2000 g.
5. Hudjakov S.A. Ustalostnaja prochnost' detalej valoprovoda tankerov proekta 1577 [Fatigue strength of the parts of the shaft pipeline of tankers of the project 1577]. Vestnik GMU im. F.F.Ushakova. Novorossiysk. 2019 g.
6. Rukovodstvo R.043-2016 «Ocenka rabotosposobnosti silikonovyh dempferov krutil'nyh kolebanij sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoranija» [Evaluation of the performance of silicone torsional vibration dampers of marine internal combustion engines], Rossijskij Rečnoj Registr-Moskva, 2016.
7. GOST R 56646-2015/ISO/TR 19201:2013 «Vibracija. Rukovodstvo po vyboru kriteriev ocenki vibracionnogo sostojanija mashin» [Vibration. Guide to the selection of criteria for evaluating the vibration state of machines]. Data vvedenija 2016-12-01
8. GOST R ISO 3046-5-2004 «Dvigateli vnutrennego sgoranija porshnevye. Harakteristiki. Chast' 5. Krutil'nye kolebanija» [Internal combustion engines are reciprocating. Specifications. Part 5. Torsional vibrations].Data vvedenija 2005-01-01.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Васильевич Герасиди, кандидат технических наук, доцент кафедры судовые тепловые двигатели

Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина,93; e-mail: gerasidi@rambler.ru

Алексей Витальевич Лисаченко, аспирант кафедры эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93,

Николай Иванович Николаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовые тепловые двигатели, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Андрей Евгеньевич Слищан, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры технологии и организации перевозок, Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), assistant professor, department of marine heat engines, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, Russia, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Alexey V. Lisahenko, graduate student of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, Russia, e-mail: alex.liss@yandex.ru

Nikolay I. Nikolaev, Dr. Sci. (Eng), professor, department of marine heat engines, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, Russia, e-mail: gmluft@kbinov.ru

Andrey E. Slitsan, Ph.D. (Eng), assistant professor, department of technology and organization of transportation, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 3/6 Petrovka street, 125993, Moscow, Russia, e-mail: slicanae@gumrf.ru

Поступила в редакцию: 10.10.2021

Принята к публикации: 17.11.2021

УДК 629.12:628.517

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.040>**Моделирование тепловых процессов в футеровке судового котла****В.А. Стенин**¹, e-mail: v.stenin@narfu.ru, **И.В. Ершова**¹, e-mail: iv.ershova@narfu.ru,**В.А. Жуков**², e-mail: va_zhukov@rambler.ru¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Судовой котлоагрегат подвергается воздействию высокого давления рабочего тела и температуры дымовых газов. Кроме того работа его осложняется также быстрой и частой сменой нагрузки. Для продолжительной и надёжной работы котлов необходимо обеспечить прочность их конструкций, в частности, футеровки. Судовые котельные агрегаты футеруются огнеупорными материалами, во многом определяющими срок службы котла. При тепловом воздействии на теплоизоляционные материалы футеровки возникают термические напряжения, приводящие к деформации, растрескиванию и разрушению кирпичной кладки. Однако ввиду сложности постановки прямого физического эксперимента пока нет однозначного ответа на вопрос, какие условия способствуют разрушительному тепловому воздействию на футеровку котла. Потому авторы предлагают исследовать тепловые процессы в кирпичной кладке методами математического моделирования. В прикладном пакете ANSYS R17.2 WORKBENCH была создана твердотельная модель элемента футеровки (кирпича), на которой исследовались стационарные и нестационарные процессы теплообмена с граничными условиями первого и третьего рода. В результате экспериментов установлено, что разность деформаций соседних слоев огнеупора пропорциональна градиенту температуры, причём в нестационарных режимах теплообмена величина температурного градиента может значительно превышать его значение в стационарных условиях. Если учесть, что при форсированной нагрузке температура дымовых газов в топочном объёме достигает предельных значений, а интенсивность конвективного теплообмена существенно возрастает, то температурные напряжения, возникающие в футеровке котла, могут превысить предел прочности огнеупора.

Ключевые слова: Судовой котёл, футеровка, кирпичная кладка, градиент температуры, стационарный и нестационарный режим теплообмена.

Simulation of thermal processes in the lining of the ship's boiler**Valery V. Stenin**¹, e-mail: v.stenin@narfu.ru, **Irina V. Ershova**¹, e-mail: iv.ershova@narfu.ru,**Vladimir A. Zhukov**², e-mail: va_zhukov@rambler.ru¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Abstract. The ship's boiler unit is exposed to the high pressure of the working fluid and the temperature of the flue gases. The operating conditions are aggravated with rapid and frequent alternations in load. To ensure continuous and reliable operation, boiler and its elements, including lining, design needs to be strong. Ship boilers are lined with fire resistant materials, which lining basically defines lifetime of a boiler. Any heat impact to lining insulation will result in thermal stress that leads to deformation, cracking and destruction of brickwork. However, as direct physical experiment is difficult to conduct, there has been no clear understanding as to what conditions cause destructive thermal impact to the boiler lining. In light of this, the authors propose to investigate thermal processes in brickwork by mathematical modeling methods. Using ANSYS R17.2 WORKBENCH application package, the solid model of the lining element (brick) was created and stationary and non-stationary heat exchange processes with the boundary conditions of the first and third order were investigated. The experiments showed that the difference of deformations of neighboring lining layers was proportional to temperature gradient, yet in non-stationary heat exchange mode the temperature gradient can be significantly higher than that in stationary conditions. Considering that in forced loading mode the temperature of flue gases in boiler furnace can reach its limit and intensity of convective heat exchange increases significantly, the temperature stress that occurs in the boiler lining can exceed the strength of fire resistant brickwork.

Key words: Ship boiler, lining, brickwork, temperature gradient, stationary and non-stationary mode of heat exchange.

Введение

Многолетняя практика эксплуатации судовых паровых котлов показывает, что разрушение обмуровочных поверхностей топок остается одной из самых распространенных причин аварий, которые сопровождаются, как правило, выходом котлов из строя и большими экономическими потерями, обусловленными простоем судна и ремонтом установки. Принято считать, что в среднем ресурс обмуровки до её замены составляет примерно 15000 – 20000 часов. Однако часты случаи, когда обмуровка выходит из строя уже через 4000 – 6000 часов, а иногда её фурменную часть меняют и через 2 – 3 месяца [1].

Судовой котлоагрегат подвергается воздействиям высокого давления рабочего тела и температуры дымовых газов. Кроме того работа его осложняется быстрой и частой сменой нагрузки, а также режимами пуска и останова судового котла. Для продолжительной и надёжной работы котлов необходимо обеспечить прочность их конструкций, в частности, футеровки. Судовые котельные агрегаты футеруются огнеупорными материалами, во многом определяющими срок службы котла. При тепловом воздействии на теплоизоляционные материалы футеровки возникают термические напряжения, приводящие к деформации, растрескиванию и разрушению кирпичной кладки. Однако, ввиду сложности постановки прямого физического

эксперимента на действующем судовом котлоагрегате, пока нет однозначного ответа на вопрос, какие условия способствуют разрушительному тепловому воздействию на футеровку котла. Потому авторы предлагают исследовать тепловые процессы в кирпичной кладке методами математического моделирования.

1. Схема обмуровки судового котлоагрегата

Кожух котла выполнен, как правило, двухслойным и состоит из наружного и внутреннего кожуха. Воздух от компрессора (дутьевого вентилятора) подается через воздушный патрубок в межобшивочное пространство котла, омывает боковые и фронтовые стенки и через направляющее устройство поступает в топку котла.

Верхний кожух ограничивает топочный объем и газоходы котла, изготовлен сварным из листового и профильного проката. Все стенки внутреннего кожуха обычно обмурованы [2, 3].

Общий вид схемы обмуровки судового котла показан на рис. 1.

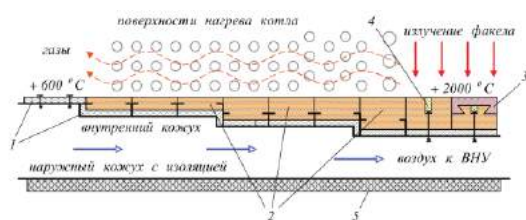


Рис. 1. Схема обмуровки судового котла:
1 – изоляция внутреннего кожуха; 2 – шамотные кирпичи; 3 – высокотемпературное изделие; 4 – мертль; 5 – изоляция наружного кожуха;
ВТУ – воздухонаправляющее устройство

Кирпичная кладка судового котла омывается высокотемпературными дымовыми газами, при этом температура поверхности огнеупора может достигать 1500...1600°С. Нижняя, верхняя, фронтовые и боковые стенки топки, а также газоходов футеруются огнеупорным кирпичом.

Все тепловые зазоры между кирпичами заполнены мертлем.

2. Температурные напряжения в огнеупорном кирпиче

При тепловом воздействии на кирпичную кладку наблюдаются изменения, как объема, так и линейных размеров материала. Это объясняется либо обратимыми процессами температурных расширений, либо остаточными явлениями тепловых воздействий [4,5]. Явления остаточных отклонений геометрических параметров огнеупорного материала объясняются физико-химическими процессами, происходящими в кирпичной кладке при критических температурах.

Теплофизические характеристики обмуровочного кирпича существенно сказываются на деформации (смещении) элементов тела при тепловых воздействиях. Напряжения, возникающие в кирпичной кладке, могут привести к ее разрушению, если превысят предел прочности материала. Если элементы кирпичной кладки лишены возможности расширяться или сжиматься, то в них возникают предельные тепловые деформации.

Тепловые напряжения возникают в футеровке при градиентном распределении температур, что наблюдается как в стационарных, так и форсированных режимах котельного агрегата. В кирпичной кладке ограничена возможность теплового расширения отдельных изделий, что способствует появлению зон с напряжениями растяжения и сжатия.

Нестационарный подвод теплоты к кирпичной кладке способствует существенному возрастанию градиента температур по толщине огнеупора и возникновению перепада температуры, величина которого меняется во времени [6].

Уровень напряжений в огнеупорном материале зависит от деформации соседних слоев, при этом тепловые напряжения пропорциональны модулю упругости, коэффициенту линейного расширения и изменению температуры [7].

$$\sigma = k \cdot l \cdot \frac{dt}{dx} \cdot G, \quad (1)$$

где σ – уровень напряжений в футеровке; k – коэффициент линейного расширения материала; l – протяженность слоя; dt/dx – градиент температур между слоями; G – модуль сдвига.

Градиент температуры в кирпичной кладке зависит от режима подвода теплоты. В стационарном режиме его величина определяется коэффициентом теплопроводности λ и плотностью теплового потока q [7]:

$$q = -\lambda \cdot dt/dx. \quad (2)$$

Нестационарный режим подвода теплоты способствует возникновению напряжений, значительно превышающих их уровень в стационарных условиях. Величина градиента температуры в обмуровке при форсированных нагрузках судового котла определяется дифференциальным уравнением теплопроводности, представленным следующей зависимостью [7]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t, \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности, величина которого зависит от теплопроводности λ , теплоемкости c_p и плотности ρ материала [7]:

$$a = \lambda / (c_p \cdot \rho). \quad (4)$$

Тепловая инерционность огнеупорного материала характеризуется коэффициентом температуропроводности. При этом интенсивность возрастания (уменьшения) температуры в изделии определяется значением коэффициента a .

Существенное значение для определения температуры в сечении кирпичной кладки имеют условия однозначности, в частности, граничные условия третьего рода [7]:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot (t_c - t_{жс}), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; $t_c, t_{жс}$ – соответственно температуры стенки и жидкости.

3. Моделирование тепловых процессов в программе ANSYS

3.1. Создание твердотельной модели

Для исследования тепловых процессов в обмуровочных материалах судового котла в прикладном пакете ANSYS R17.2 WORKBENCH [8] была создана твердотельная модель кирпича следующих размеров: длина – 0,23 м, ширина – 0,065 м, высота – 0,114 м (рис. 2).

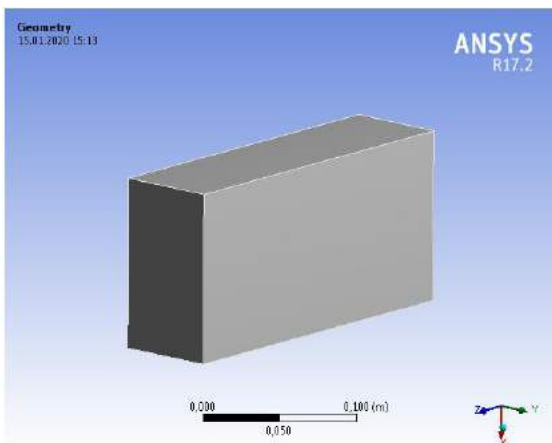


Рис. 2. Общий вид твердотельной модели

Теплофизические свойства модельного материала принимались усредненные: коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; плотность $\rho = 670 \text{ кг}/\text{м}^3$. Модель делилась плоскостями на семь слоев, параллельных постельной грани кирпича. Расстояние между слоями – 10 мм, первый слой имеет толщину 5 мм (рис. 3).

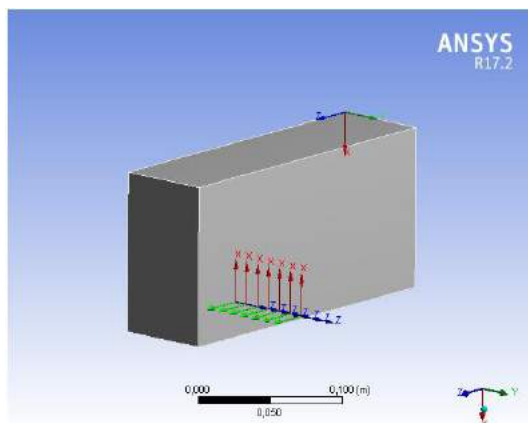


Рис. 3. Расчётный слой модели

3.2. Исследование стационарных процессов теплообмена

Математическое моделирование в пакете ANSYS R17.2 WORKBENCH стационарных процессов теплообмена в опытном образце проводилось с граничными условиями 1 рода. Температура на поверхности первой постельной грани опытного образца принималось соответственно равной 100°C , а на поверхности второй постельной грани составила 22°C . Температурное поле модели представлено на рис. 4.

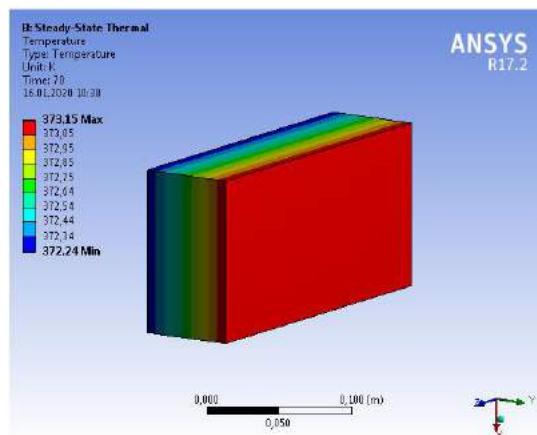


Рис. 4. Температурное поле модели

Порядок определения точечных значений температур в опытном образце по координате (ось y) показан на рис. 5, а график распределения температуры по толщине образца представлен на рис. 6.

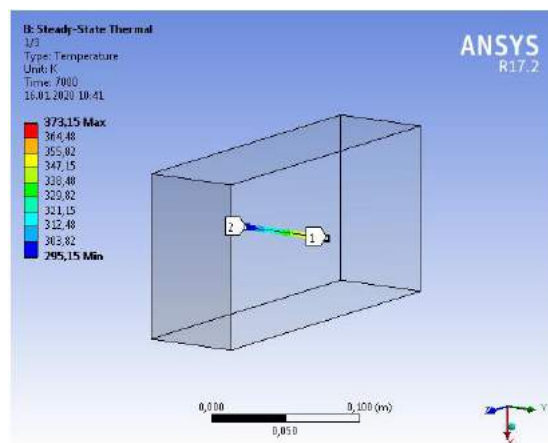


Рис. 5. Порядок определения точечных значений температур в образце по координате y

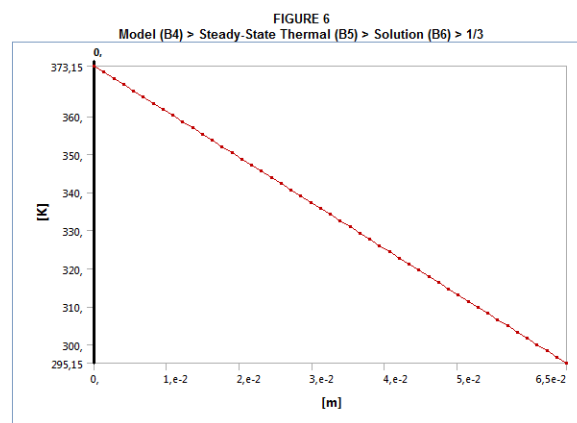


Рис. 6. Распределение температуры по толщине образца

На рис. 7 показана методика графического определения стационарного градиента температуры в модельном эксперименте, значение которого составило $grad t = \Delta T / \Delta l = 1200 \text{ К}/\text{м}$. Для определения градиента температуры следует

поделить приращение температуры (отрезок аб, показанный на рис. 7) на толщину слоя модели.

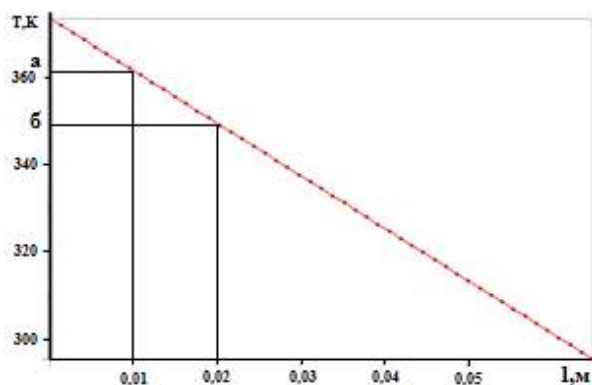


Рис. 7. Определение стационарного градиента температуры в образце

3.3. Исследование нестационарных процессов теплообмена

При исследовании нестационарного теплообмена в модельном эксперименте, прежде всего, сформулируем условия для одномерного уравнения теплопроводности.

Начальные условия состоят в задании температуры в опытном образце по координате в начальный момент времени. Температура материала модели (огнеупора) составила $t_0 = 22^{\circ}C$ в начальный момент времени. Представим кирпич в виде неограниченной пластины. С одной стороны пластины температура газов равна $t_1 = 100^{\circ}C$, а с другой стороны постельная грань кирпича омывалась воздухом с температурой $t_0 = 22^{\circ}C$. В том и другом случае устанавливался режим свободной конвекции с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На рис. 8 представлен первый исследуемый слой кирпича, в котором регистрировалось изменение температуры во времени при ступенчатом подводе теплоты к постельной грани модели. Результаты модельного эксперимента по определению температурной кривой переходного процесса показаны на рис. 9.

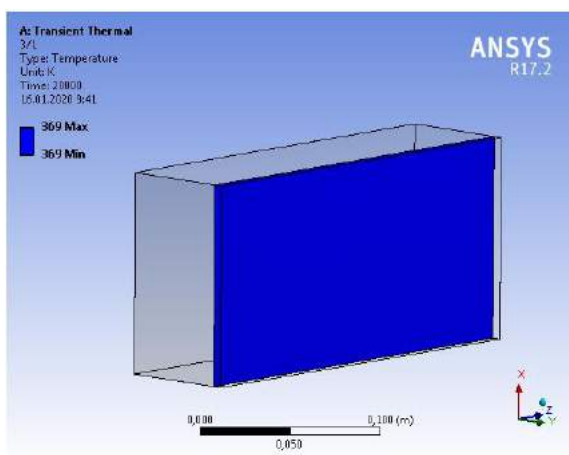


Рис. 8. Первый исследуемый слой кирпича

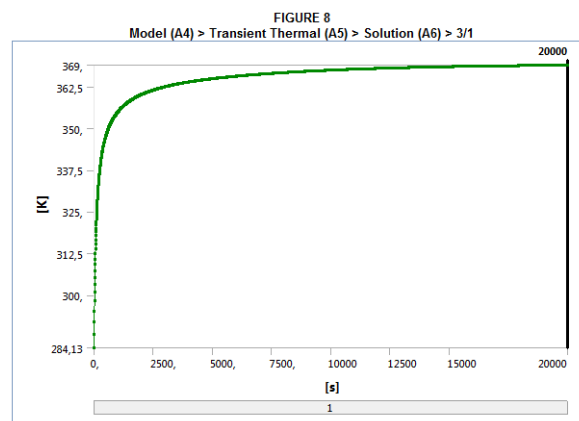


Рис. 9. Изменение температуры первого слоя кирпича при ступенчатом подводе теплоты

Для определения нестационарного температурного градиента в материале опытного образца на рис. 10 показаны переходные функции (изменение средней температуры слоя материала во времени при ступенчатом тепловом воздействии) для каждого из семи исследуемых слоев.

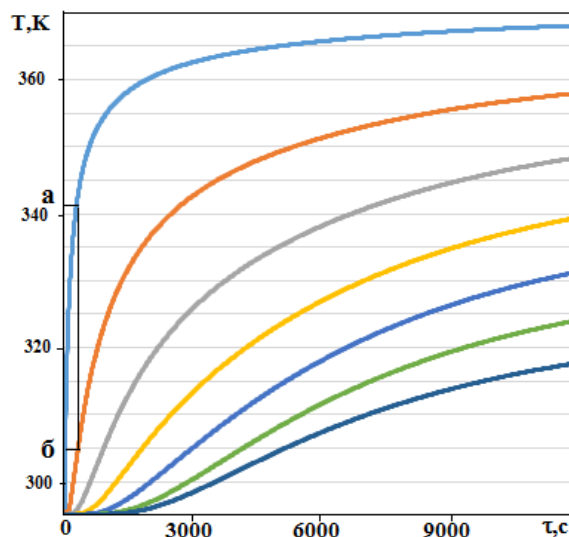


Рис. 10. Определение нестационарного градиента температуры в образце

Графическое определение градиента температуры для первых двух слоев осуществлялось следующим образом. Для одного и того отрезка времени, принимаемого по оси абсцисс, определялась температура первого и второго слоя (отрезок аб на оси ординат), а затем ее значение делилось на толщину слоя. Величина нестационарного температурного градиента, полученная в модельном эксперименте, увеличилась до значения $grad t = \Delta T / \Delta l = 3600 \text{ К}/\text{м}$.

Заключение

В прикладном пакете ANSYS R17.2 WORKBENCH была создана твердотельная модель элемента футеровки (кирпича), на которой исследовались стационарные и нестационарные процессы теплообмена с граничными условиями первого и третьего рода. В результате экспериментов

установлено, что разность деформаций соседних слоев огнеупора пропорциональна градиенту температуры, причём в нестационарных режимах теплообмена величина температурного градиента может значительно превышать его значение в стационарных условиях. Если учесть, что при форсированной нагрузке температура дымовых

газов в топочном объёме достигает предельных значений, а интенсивность конвективного теплообмена существенно возрастает, то температурные напряжения, возникающие в футеровке котла, могут превысить предел прочности огнеупора.

Литература

1. Петров А.И. Оценка причин повреждений обмуровок в топках судовых паровых котлов // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18. № 1. С. 17 – 19.
2. Гусаров А.Б. Особенности устройства и эксплуатации паровых котлов корабельных КТЭУ. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. 120 с.
3. Корнилов Э.В. Вспомогательные, утилизационные, термомасляные котлы морских судов (конструкция и эксплуатация). Одесса: «ЭкспрессРеклама», 2008. 240с.
4. Земляной К.Г. Служба огнеупоров. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 172 с.
5. Кашеев И.Д., Стрелов К.К. Испытания и контроль огнеупоров. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 286 с.
6. Баранов П.А. Предупреждение аварий паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 272 с.
7. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М.: Книжный дом «Либроком», 2018. 651 с.
8. Бруяка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. 271 с.

References

1. Petrov A.I. Ocenka prichin povrezhdenij obmurovok v topkakh sudovyh parovyh kotlov [Estimation of reasons of refractory damage in ship steam boilers' furnaces]. Vestnik MGTU. 2015. T. 18. № 1. S. 17 – 19.
2. Gusarov A.B. Osobennosti ustrojstva i jekspluatacii parovyh kotlov korabel'nyh KTEU [Features of the device and operation of steam boilers ship KTEU]. Vladivostok, izd. DVG TU, 2006, 120 s.
3. Kornilov Je.V. Vspomogatel'nye, utilizacionnye, termomasljannye kotly morskikh sudov (konstrukcija i jekspluatacija) [Auxiliary, utilization, thermal oil boilers for sea vessels (construction and operation)]. Odessa: «JekpressReklama», 2008, 240s.
4. Zemljanoj K.G. Sluzhba ogneuporov [Refractory service]. Ekaterinburg, izd. Ural. un-ta, 2018, 172 s.
5. Kashheev I.D., Strel'ov K.K. Ispytanija i kontrol' ogneuporov [Testing and control of refractories]. M., Internet Inzhiniring, 2003, 286 s.
6. Baranov P.A. Preduprezhdenie avarij parovyh kotlov [Prevention of accidents in steam boilers]. M., Jenergoatomizdat, 1991, 272 s.
7. Kartashov Je.M., Kudinov V.A. Analiticheskaja teorija teploprovodnosti i prikladnoj termouprugosti [Analytical theory of thermal conductivity and applied thermoelasticity]. M., Knizhnyj dom «Librokom», 2018, 651 s.
8. Brujaka V.A. Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench: uchebnoe posobie [Engineering Analysis in ANSYS Workbench]. Samara, izd. Samarskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2010, 271 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Александрович Стенин, доктор технических наук, профессор кафедры океанотехники и энергетических установок, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: v.stenin@narfu.ru

Valery A. Stenin, Dr. Sci. (Eng), Professor of Department of Ocean Technics and Power Plants, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoi Dviny St., 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: v.stenin@narfu.ru

Ершова Ирина Валерьевна, старший преподаватель кафедры математики и информационных технологий, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 163002, Российская Федерация, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, e-mail: iv.ershova@narfu.ru

Irina V. Ershova, The senior lecturer, the senior lecturer of Department of Mathematics and Information Technology, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoi Dviny St., 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: iv.ershova@narfu.ru

Жуков Владимир Анатольевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой судостроения и энергетических установок, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: va_zhukov@rambler.ru

Vladimir A. Zhukov, Dr. Sci. (Eng), Head of Department of Shipbuilding and Power Plants, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya St., 5/7, Saint Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: va_zhukov@rambler.ru

Поступила в редакцию: 26.09.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

Коррозионная стойкость в морских условиях алюминиевого сплава амг3, обработанного короткоимпульсным плазменным электролитическим оксидированием

В.С. Егоркин¹, e-mail: egorkin@ich.dvo.ru, **И.Е. Вялый**¹, e-mail: igorvyal@gmail.com, **Н.В. Изотов**^{1,2}, e-mail: nikolaj.izotov@mail.ru, **А.Н. Минаев**^{1,2}, e-mail: aminaev@mail.ru, **С.Л. Синебрюхов**¹, e-mail: sls@ich.dvo.ru, **С.В. Гнеденков**¹, e-mail: svg21@hotmail.com

¹Институт химии ДВО РАН, проспект столетия Владивостока, 159, Владивосток 690022, Россия,

²Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток 690922, Россия

Аннотация: Алюминиевые сплавы находят все более широкое применение в морской технике как для строительства корпусов судов, так и для изготовления различного судового оборудования, трубопроводов и других устройств. Однако применение алюминиевых сплавов в элементах морской техники, подвергающихся прямому контакту с морской водой или работающих в условиях морской атмосферы, требует дополнительного изучения и разработки мер по улучшению антикоррозионных свойств. Формирование защитных покрытий на поверхности алюминиевых сплавов методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) позволяет повысить антикоррозионные характеристики.

В работе представлены результаты комплексных исследований коррозионной стойкости и морфологии ПЭО-покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве АМг3, в камере соляного тумана и при натуральных испытаниях в морской воде и в морской атмосфере. Показано, что обработка алюминиевого сплава АМг3 методом плазменного электролитического оксидирования с использованием короткоимпульсного поляризирующего сигнала приводит к улучшению коррозионных характеристик формируемого покрытия.

Ключевые слова: Алюминиевые сплавы, защитные покрытия, плазменное электролитическое оксидирование, микросекундные импульсы, коэффициент заполнения, антикоррозионные покрытия.

Corrosion properties of amg3 aluminum alloy treated by short-pulse plasma electrolytic oxidation in marine conditions

Vladimir S. Egorkin¹, e-mail: egorkin@ich.dvo.ru, **Igor E. Vyalyi**¹, e-mail: igorvyal@gmail.com, **Nikolay V. Izotov**^{1,2}, e-mail: nikolaj.izotov@mail.ru, **Alexander N. Minaev**^{1,2}, e-mail: aminaev@mail.ru, **Sergey L. Sinebryukhov**¹, e-mail: sls@ich.dvo.ru, **Sergey V. Gnedenkov**^{1,2}, e-mail: svg21@hotmail.com

¹Institute of Chemistry of FEB RAS, 159, pr-t Stoletiya Vladivostoka, Vladivostok 690022, Russia, ²Far Eastern Federal University, p. Ajax, 10, o. Russian, Vladivostok 690922, Russia

Abstract: Aluminum alloys are increasingly used in marine engineering both for the construction of ship hulls and for the manufacture of various ship equipment, pipelines and other devices. However, the use of aluminum alloys in elements of marine technology exposed to direct contact with sea water or operating in the sea atmosphere requires additional study and development of ways to improve anticorrosion properties. The formation of protective coatings on the surface of aluminum alloys by the method of plasma electrolytic oxidation (PEO) enable one to increase the anticorrosive characteristics.

The paper presents the results of comprehensive studies of the corrosion resistance and morphology of PEO coatings formed on the AMg3 aluminum alloy in a salt spray chamber and during field tests in sea water and in the marine atmosphere. It is shown that the treatment of the AMg3 aluminum alloy by the method of plasma electrolytic oxidation with the use of a short-pulse polarizing signal leads to an improvement in the corrosion characteristics of the formed coating.

Keywords: Aluminum alloys, protective coatings, plasma electrolytic oxidation, microsecond pulses, duty cycle, anticorrosion coatings.

Введение

Плазменное электролитическое оксидирование [1, 2] является одним из наиболее эффективных методов поверхностной обработки, который позволяет создавать многофункциональные покрытия для защиты металлов и сплавов от воздействия агрессивных сред. Метод динамично развивается, что требует решения сложных задач, связанных с выявлением механизма формирования покрытий, определением их структуры и свойств [3, 4]. С помощью ПЭО-метода можно успешно обрабатывать сплавы алюминия, титана, магния и других вентильных металлов [5]. Формируемые покрытия могут быть использованы как подслой для последующего нанесения лакокрасочного материала, а также как матрица для формирования защитных композиционных

полимерсодержащих, в том числе антиобледенительных, слоёв.

Однако применение алюминиевых сплавов в конструкционных элементах, подвергающихся прямому контакту с морской водой или работающих в условиях морской атмосферы, требует дополнительного изучения и разработки мер по улучшению антикоррозионных свойств материалов. Беспористый подслой ПЭО-покрытий обеспечивает преимущество в снижении коррозии алюминия по сравнению с другими защитными покрытиями. При этом следует отметить, что микропоры неизбежно образуют пористый внешний слой, что, в свою очередь, ограничивает защитный потенциал ПЭО-слоев при длительном контакте с коррозионной средой. Ранее было установлен факт уменьшения диаметра пор в покрытиях при увеличении коэффициента заполнения (D) короткоимпульсного

поляризующего сигнала при ПЭО [6, 7]. В результате исследования электрохимическими методами выявлены высокие барьерные свойства ПЭО-покрытий, т.е. снижение плотности тока коррозии почти на 3 порядка по сравнению с алюминиевым сплавом АМг3 без покрытия.

Однако условия промышленной эксплуатации и лабораторных испытаний могут значительно отличаться [8–10]. В связи с этим, возникает необходимость в проведении комплексных исследований электрохимическими методами коррозионной стойкости (на основе натуральных испытаний в камере соляного тумана, в морской воде и морской атмосфере).

Цель работы - проведение комплексных исследований коррозионной стойкости ПЭО-покрытий на алюминиевом сплаве АМг3 электрохимическими методами, в камере соляного тумана и натуральных испытаний в морской воде и в морской атмосфере.

Методика

Климатические испытания проводили на морской коррозионной станции Института химии ДВО РАН (г. Владивосток, остров Русский, бухта Рында, Японское море), находящейся у морского побережья вод среднеокеанического состава (30–35%).

В качестве образцов использовали пластины из алюминиевого сплава АМг3 (масс. %: Mg 3,75; Si 0,78; Fe 0,43; Mn 0,38; Zn 0,10; Cu 0,10; Ti 0,10; Cr 0,05; Al – остальное). Пластины обрабатывали наждачными бумагами различной зернистости до достижения параметра шероховатости $R_a = 0,12$ мкм.

Атмосферные испытания проводили под углом 45° к горизонту. Образцы размерами $100 \times 150 \times 2$ мм³ крепили к деревянным поперечинам с помощью керамических изоляторов. Расстояние между образцами по горизонтали составляло 30 мм, по вертикали - не менее 20 мм. Стенд с образцами устанавливали на расстоянии 15 м от береговой линии. Длительность испытаний составила 1 год.

Испытания на морскую коррозию проводили погружением образцов в морскую воду на расстоянии 15 м от береговой линии на глубину 1,5–2 м. Испытания проводили в период плюсовых температур (июнь-октябрь). Пластины размерами $50 \times 50 \times 2$ мм³ закрепляли на раме из нержавеющей стали нейлоновым шнуром, расстояние между образцами по вертикали и горизонтали – 50 мм.

Для проведения оксидирования использовали транзисторный источник тока, позволяющий формировать и контролировать импульсы длительностью до 5 мкс при уровне рабочего напряжения до 1000 В. Для расчета затрачиваемого на процесс ПЭО количества электричества проводили интегрирование записанных мгновенных значений тока и напряжения по времени с использованием программного обеспечения PowerGraph (ООО «ДИСофт», Россия).

Формирование ПЭО-слоев проводили в биполярном режиме в течение 30 и 60 мин. В анодной фазе напряжение увеличивали в два этапа: от 30 до 360 В со скоростью повышения напряжения 66 В/мин и от 360 до 420 В со скоростью 2,4 В/мин и 1,09 В/мин соответственно. В катодной фазе в обоих случаях ПЭО-обработку проводили при постоянной плотности тока $0,1$ А/см².

Оксидирование проводили при различном коэффициенте заполнения поляризующего сигнала (D) 0,06, 0,12 и 0,21. Для установления данных значений D изменяли длительность паузы между 5 мкс импульсами. Установлено, что более оптимальным для снижения дефектности ПЭО-покрытий является режим при меньшей паузе в ряду 78, 37 и 19 мкс. D определяется уравнением $D = t_{on}/(t_{on} + t_{off})$, где t_{on} и t_{off} – длительности импульса и паузы, соответственно.

В состав электролита для ПЭО входили следующие компоненты: 0,6 г/л NaF, 5 г/л $C_4H_4O_6K_2 \cdot 0,5H_2O$, 10 г/л $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, 10 г/л $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$, 10 г/л $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$. В качестве растворителя использовали деионизированную воду.

Смачиваемость покрытий исследовали на приборе DSA100 (KRÜSS, Германия). Тестовой жидкостью служил 3 % раствор хлорида натрия. Объем капли составлял 6 мкл. На каждом образце измерения проводили по 5 точкам, после чего рассчитывали среднее значение и погрешность.

Уровень коррозионной защиты, обеспечиваемый формируемыми покрытиями, был оценён с использованием системы VersaSTAT MC (Ametek, PAR, США). Измерения проводили в трехэлектродной ячейке, заполненной 3 % водным раствором NaCl.

Совместно с электрохимическими исследованиями ПЭО-покрытий были проведены испытания в камере соляного тумана S120 (Ascott Analytical) по ГОСТ Р 52763-2007. Распыление 5 % раствора NaCl проводили в течение 15 минут через каждые 45 минут паузы. Испытания проводили в течение 7 суток и при температуре в камере 27–29 °С. После окончания коррозионных тестов поверхность образцов исследовали на наличие коррозионных разрушений. Анализ морфологии покрытий проводили по СЭМ-изображениям, полученным на Evex Mini-SEM (Evex Analytical Instruments, США), с помощью программного обеспечения ImageJ 1.50v.

Экспериментальная часть

Анализ представленных в таблице данных показал, что при увеличении коэффициента заполнения с 0,06 до 0,12 количество электричества (Q), затраченного на формирование поверхностных слоев в течение 30 мин, возрастало в 1,27 раза, а при увеличении D до 0,21 – в 1,63 раза. На получение ПЭО-слоев в 60 мин биполярном режиме при повышении D от 0,06 до 0,12, было затрачено Q в 1,43 раза больше, а до 0,21 – в 1,83 раза (таблица 1). Увеличение времени ПЭО от 30 до 60 мин приводило к соответствующему двукратному росту толщины (таблица), а увеличение коэффициента заполнения от 0,06 до 0,21 – к снижению более чем в 3 раза пористости ПЭО-покрытий (от 2,9 до 0,8 %). Исследование гидрофобности показало, что сформированные короткоимпульсным поляризующим сигналом поверхностные слои в исследуемом диапазоне коэффициента заполнения проявляют стабильную низкую смачиваемость при длительном контакте поверхности с каплей 3 % раствора NaCl. С увеличением от 30 до 60 мин длительности ПЭО и от 0,06 до 0,21 коэффициента заполнения, угол смачивания увеличивается от $(99 \pm 3)^\circ$ до $(123 \pm 3)^\circ$.

Таблица 1

Зависимость параметров ПЭО-покрытий и затраченного количества электричества от условий формирования

Параметр	АМеЗ	Условия формирования					
		30 мин			60 мин		
		D=0,06	D=0,12	D=0,21	D=0,06	D=0,12	D=0,21
Q [Кл]		108±3	137±5	176±2	192±8	275±3	351±4
Толщина [мкм]	-	3,6±0,4	4,6±0,4	5,3±0,3	5,8±1,6	8,2±1,6	11,6±1,9
Пористость [%]		2,9	2,2	0,9	1,5	1,4	0,8
j_k [А/см ²]	2·10 ⁻⁷	9·10 ⁻¹⁰	8·10 ⁻¹⁰	6·10 ⁻¹⁰	8·10 ⁻¹⁰	4·10 ⁻¹⁰	2·10 ⁻¹⁰
E_k , В (н.к.э.)	-0,71	-0,70	-0,68	-0,67	-0,67	-0,66	-0,65
$ Z _{f=0,01 \text{ Гц}}$ [Ом·см ²]	2·10 ⁵	3·10 ⁷	3·10 ⁷	5·10 ⁷	3·10 ⁷	7·10 ⁷	1·10 ⁸
Угол смачивания [°]	>90	99±3	107±2	113±3	114±2	118±2	123±3

Данное увеличение значений угла смачивания можно объяснить изменениями морфологической структуры ПЭО-покрытий (Рис. 1). В совокупности с низкой пористостью данные изменения поверхностных слоев обеспечили высокие электрохимические и гидрофобные свойства. В этой связи, среди сформированных в исследуемом диапазоне D и времени ПЭО защитных покрытий, наибольшее снижение j_k (до $2,4 \cdot 10^{-10}$ А/см²) и увеличение модуля импеданса (до $1,1 \cdot 10^8$ Ом·см²) наблюдается у покрытия, сформированного при коэффициенте заполнения 0,21 и времени формирования 60 мин. Определение значений стационарного потенциала сплава проводили в растворе 3% NaCl, являющемся аналогом морской воды. Проведенное исследование показало, что формирование на поверхности сплава алюминия барьерных слоев приводит к облагораживанию значений стационарного потенциала, причём для покрытий, имеющих большую толщину и меньшую пористость, данное изменение более выражено.

Исследование барьерных свойств сформированных ПЭО-покрытий в течение 7-сут выдержки в камере соляного тумана не привели к существенному коррозионному разрушению ПЭО-покрытий. Визуальный осмотр показал, что незначительные изменения оттенка цвета поверхности произошли у ПЭО-слоев, сформированных за 30 мин оксидирования при $D=0,06$. Это связано с большей пористостью и меньшей толщиной, в сравнении с оксидными покрытиями, полученными при больших значениях D и длительности ПЭО. Более детальный анализ поверхности ПЭО-покрытий после испытаний в среде соляного тумана провели на электронном сканирующем микроскопе (Рис. 1). СЭМ-изображения поверхности образцов позволили убедиться в отсутствии микродефектов и трещин у всего ряда защитных слоев (Рис. 1, а-е).

Барьерные свойства ПЭО-покрытия, полученного при $D = 0,21$ в течение 60 мин, после 7 дней испытаний в камере соляного тумана были дополнительно исследованы методами потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии. Результаты представлены на Рис. 2 в сравнении с образцом без покрытия.

На образцах с покрытием не наблюдалось точечной коррозии, что согласуется с электрохимическими испытаниями (Рис. 2), проведенными после воздействия соляного тумана, где наблюдается лишь небольшие увеличения плотности тока коррозии и снижение модуля импеданса. Образцы без покрытий, напротив,

демонстрируют увеличение токов коррозии почти на два порядка с соответствующим снижением значений модуля импеданса.

Согласно вышеприведенным результатам для натуральных испытаний были выбраны образцы, полученные при $D = 0,21$ и времени формирования 60 мин. В качестве контрольных использовались образцы без покрытия. На рисунке 3 представлены фотографии образцов, сделанные до и после атмосферных и морских испытаний.

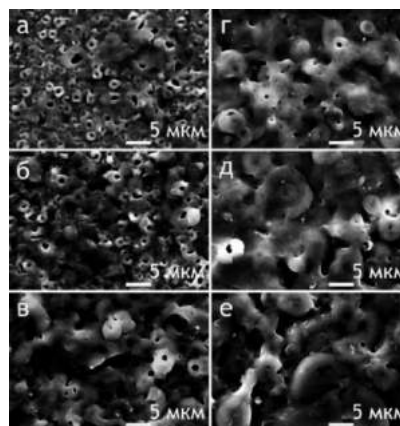


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности после испытаний в камере соляного тумана ПЭО-покрытий, полученных в течение 30 мин (а-в) и 60 мин (г-е) при D , равном: 0,06 (а, г); 0,12 (б, д) и 0,21 (в, е).

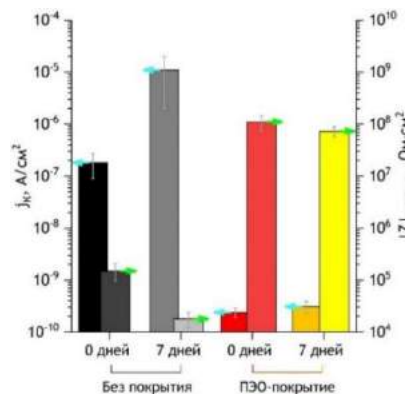


Рис. 2. Значения j_k , рассчитанные по потенциодинамическим кривым, и модуля импеданса на частоте 0,01 Гц, полученные в 3 % растворе NaCl для образцов без покрытия и с ПЭО-покрытием (60 мин, $D = 0,21$) до (0 дней) и после (7 дней) испытаний в камере соляного тумана

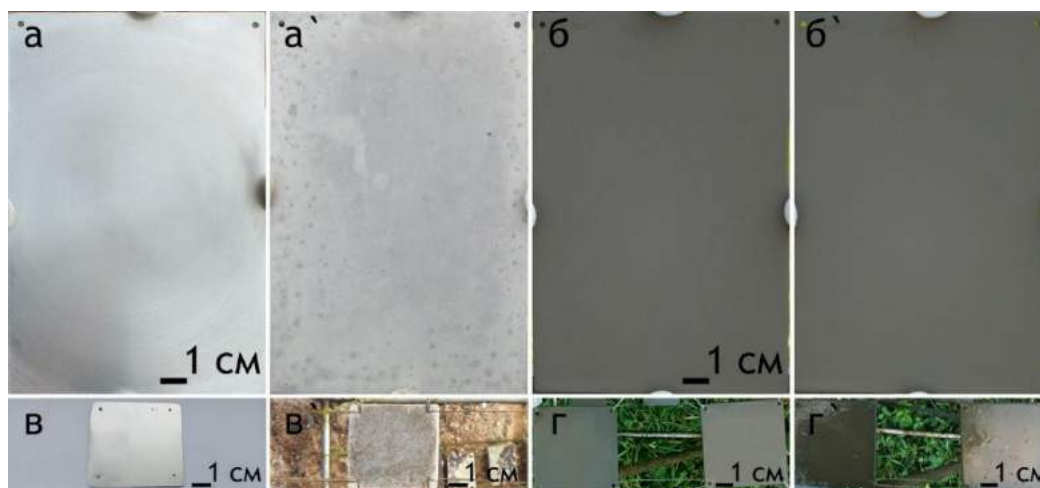


Рис. 3. Фотографии образцов из алюминиевого сплава АМг3 без защитного покрытия (а, а', в, в') и с ПЭО-слоем (б, б', г, г') до (а-в) и после 1 года атмосферных (а'-б') и морских (в'-г') испытаний (июнь-октябрь)

Образцы с защитным покрытием (Рис. 3, б, б') выдержали атмосферные испытания значительно лучше, в сравнении с чистыми образцами алюминиевого сплава АМг3 (Рис. 3, а, а'). Представленные фотографии демонстрируют, что ПЭО-покрытие не подверглось изменениям внешнего вида и выцветанию после длительного воздействия атмосферных факторов. Также отмечено отсутствие на них дефектов (питтингов, микротрещин, сколов). В свою очередь на незащищенном образце имеется большое количество питтингов и продуктов коррозии (Рис. 3, а'). В течение исследуемого периода морских испытаний было установлено, что практически вся поверхность образца без покрытия существенным образом подверглась коррозии (Рис. 3, в') в то время как для образца с ПЭО-покрытием изменений не отмечено (Рис. 3, г').

Заключение

В результате проведенного исследования показана возможность надежной работы алюминиевого сплава с ПЭО-покрытием в морских

условиях, определены особенности влияния короткоимпульсного сигнала, а также коэффициента заполнения, на морфологию, пористость, гидрофобные и электрохимические свойства ПЭО-покрытий.

Проведенные исследования показали увеличение стойкости к питтинговой коррозии, однако следует отметить, что в морских условиях контактная и щелевая коррозия являются распространенными и опасными видами разрушения. Можно предположить, что ПЭО-покрытия также позволят снизить их негативное воздействие на защищаемый сплав, в то же время эти виды коррозии являются многофакторными процессами, требующими проведения дополнительных лабораторных исследований и натуральных экспериментов.

Дополнительная информация

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-29-13020.

Литература / References

- Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Puz' A.V., Gnedenkov A.S., Vyalyi I.E., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S. Plasma electrolytic oxidation coatings formed with microsecond current pulses. *Solid State Phenomena*. 2014;213:149–153.
- Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S. L., Mashtalyar D.V., Tsvetnikov A.K., Minaev A.N. Effect of conditions of treatment with superdispersed polytetrafluoroethylene on properties of composite coatings. *PROTECTION OF METALS AND PHYSICAL CHEMISTRY OF SURFACES*. Том: 46. Выпуск: 7. Стр.: 823-827. DOI: 10.1134/S2070205110070154. DEC 2010
- Zhang X., Aliasghari S., Němcová A., Burnett T.L., Kuběna I., Šmíd M., Thompson G.E., Skeldon P., Withers P.J. X-Ray Computed Tomographic Investigation of the Porosity and Morphology of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings. *ACS Applied Materials Interfaces*. 2016;8:8801–8810.
- Zou B., Lü G., Zhang G., Tian Y. Effect Of Current Frequency on Properties of Coating Formed By Microarc Oxidation on AZ91D Magnesium Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society*. 2015;25:1500–1505.
- Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Puz' A.V., Gnedenkov A.S., Vyalyi I.E., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S. Plasma electrolytic oxidation coatings formed with microsecond current pulses. *Solid State Phenomena*. 2014;213:149–153.
- Tavares M.D.M., Vitoriano J.D.O., Silva R.C.L. da, Franco A.R., Souza G.B. de, Costa J.A.P. da, Alves-Junior C. Effect of duty cycle and treatment time on electrolytic plasma oxidation of commercially pure Al samples // *J. Mater. Res. Technol.* 2019. Vol. 8. P. 2141–2147. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.01.020.

7. Egorkin V.S., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyaliy I.E., Gnedenkov A.S., Chizhikov R.G. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy // Surf. Coat. Technol. 2018. Vol. 334. P. 29–42. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.025.
8. Arunnellaiappan T., Babu Kishore N., Krishna Rama L., Rameshbabu N. Influence of frequency and duty cycle on microstructure of plasma electrolytic oxidized AA7075 and the correlation to its corrosion behavior // Surf. Coat. Technol. 2015. Vol. 280. P. 136–147. doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.08.043.
9. Kajánek D., Hadzima B., Buhagiar J., Wasserbauer J., Jacková M. Corrosion degradation of AZ31 magnesium alloy coated by plasma electrolytic oxidation // Transp. Res. Procedia. 2019. Vol. 40. P. 51–58. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.010.
10. Ji R., Ma M., He Y., Liu C., Fang T., Zhang Z., Wang Y., He Y., Wu J. Improved corrosion resistance of Al₂O₃ ceramic coatings on AZ31 magnesium alloy fabricated through cathode plasma electrolytic deposition combined with surface pore-sealing treatment // Ceram. Inter. 2018. Vol. 44. P. 15192–15199. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Сергеевич Егоркин, кандидат химических наук, заведующий лабораторией электрохимических процессов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: egorkin@ich.dvo.ru

Игорь Евгеньевич Вялый, младший научный сотрудник лаборатории нестационарных поверхностных процессов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: igorvyal@gmail.com

Николай Владимирович Изотов, младший научный сотрудник лаборатории функциональных электрохимически активных материалов Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, аспирант Дальневосточного федерального университета, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток 690922, Россия, e-mail: nikolaj.izotov@mail.ru

Александр Николаевич Минаев, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории нестационарных поверхностных процессов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, профессор отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Политехнического института (Школы), Дальневосточного федерального университета, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток 690922, Россия, e-mail: aminaev@mail.ru

Сергей Леонидович Синебрюхов, доктор химических наук, доцент, заместитель директора, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: sls@ich.dvo.ru

Сергей Васильевич Гнеденков, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, директор, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: svg21@hotmail.com

Vladimir S. Egorkin, Ph.D. (chemistry), Head of the Laboratory of Electrochemical Processes, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 100-letya Vladivostoka prosp., 159, Vladivostok, Russia, 690022, e-mail: egorkin@ich.dvo.ru

Igor E. Vyalyi, Junior Researcher, Laboratory of unstable surface processes, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 100-letya Vladivostoka prosp., 159, Vladivostok, Russia, 690022, e-mail: igorvyal@gmail.com

Nikolai V. Izotov, Junior Researcher, Laboratory of Functional Electrochemically Active Materials, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 100-letya Vladivostoka prosp., 159, Vladivostok, Russia, 690022, post-graduate student of the Far Eastern Federal University, p. Ajax, 10, o. Russian, Vladivostok 690922, Russia, e-mail: nikolaj.izotov@mail.ru

Alexander N. Minaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Nonstationary Surface Processes, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 100-letya Vladivostoka prosp., 159, Vladivostok, Russia, 690022, Professor of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, p. Ajax, 10, o. Russian, Vladivostok 690922, Russia, e-mail: aminaev@mail.ru

Sergey L. Sinebryukhov, Dr. Sci. (Chem), Associate professor, Deputy director, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 100-letya Vladivostoka prosp., 159, Vladivostok, Russia, 690022, e-mail: sls@ich.dvo.ru

Sergey V. Gnedenkov, Corresponding member RAS, Dr. Sci. (Chem), Professor, Director, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 100-letya Vladivostoka prosp., 159, Vladivostok, Russia, 690022, e-mail: svg21@hotmail.com

Поступила в редакцию: 27.07.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

УДК 621.438.1 ... 621.438.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.042>

Распределение потерь кинетической энергии между сопловым аппаратом и рабочим колесом турбин на режимах частичного подвода газа

Ю.В. Соломахин¹, e-mail: y.solomahin@mail.ru, Л.П. Цыганкова², e-mail: tsyganкова.lp@dvfu.ru,
В.П. Коршунов², e-mail: korshunov.vn@dvfu.ru

¹Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, ²Дальневосточный Федеральный Университет

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований связанных с распределением потерь кинетической энергии между сопловым аппаратом и рабочим колесом у осевых малорасходных турбинных ступеней. У всех ступеней конструктивные углы выхода сопел были менее 9°, что повлекло за собой необходимость выполнения рабочих колес с относительным шагом установки рабочих лопаток значительно большим, рекомендованного в технической литературе. Исследования проведены для ступеней со средним диаметром 250 мм. Диапазон изменения факторов составил: отношение давлений перед соплами к давлению за ступенью от 2.0 до 5.0; частоты вращения вала с рабочим колесом от 0 до 14000 об·мин⁻¹. Эффективность использования кинетической энергии приведена в виде коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса. Коэффициенты представляют собой отношение реальной скорости потока на выходе из соплового аппарата (рабочего колеса) к теоретически возможной скорости газа в выходном сечении рассматриваемого элемента ступени. Выявлено, что коэффициенты скорости сопловых аппаратов и рабочих колес изменяются не только при смене режимных параметров, таких как частота вращения ротора и отношения давлений на ступень, но и при изменении степени парциальности ступени.

Ключевые слова: микротурбина, малоразмерная турбина, сопло, сопловой аппарат, рабочая лопатка, рабочее колесо, коэффициент скорости, парциальность, газ, рабочее тело.

Distribution of kinetic energy losses between nozzles and turbine impeller on partial gas supply modes

Yuriy V. Solomakhin¹, e-mail: y.solomahin@mail.ru, Lyudmila P. Tsigankova², e-mail: tsyganкова.lp@dvfu.ru,
Viktor N. Korshunov², e-mail: korshunov.vn@dvfu.ru

¹Vladivostok State University Economics and Service, ²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of experimental studies related to the distribution of kinetic energy losses between the nozzle apparatus and the impeller at axial low-flow turbine stages. At all stages, the design angles of the nozzle exit were less than 9°, which entailed the necessity of making impellers with a relative pitch of the rotor blades that was much larger, as recommended in the technical literature. The studies were carried out for steps with an average diameter of 250 mm. The range of variation of the factors was the ratio of the pressures in front of the nozzles to the pressure behind the stage from 2.0 to 5.0; rotation speed of the shaft with the impeller from 0 to 14000 rpm. The efficiency of using the kinetic energy is given in the form of the coefficients of the speed of the nozzle apparatus and the impeller. The coefficients represent the ratio of the actual flow rate at the outlet of the nozzle apparatus (impeller) to the theoretically possible gas velocity in the outlet section of the stage element under consideration. It was found that the speed coefficients of the nozzle apparatus and impellers change not only when changing operating parameters, such as the rotor speed and the pressure ratio per stage, but also when changing the degree of stage partiality.

Keywords: microturbine, small turbine, nozzle, nozzle apparatus, rotor blade, impeller, velocity coefficient, partiality, gas, working fluid.

Введение

Одной из наиболее важных и никогда не теряющих своей актуальности задач, всегда стоящей перед конструкторами, работающими в области судовой энергетики, является повышение эффективности машин и механизмов, входящих не только в состав судовых энергетических установок (СЭУ), но и в состав энергетических установок любых транспортных средств. Решение этой задачи ведется, так же, в направлении снижения удельного расхода топлива на единицу вырабатываемой мощности, т.е. повышения энергетической эффективности элементов, входящих в состав СЭУ, в том числе газовых (паровых) турбин. Они входят в состав турбогенераторов, турбонасосов, устройств турбонаддува, пневмоинструмента в качестве приводного двигателя и других изделий. И если для турбин, работающих в условиях отсутствия массогабаритных ограничений при достаточно

большом расходе газа (водяного пара), задачу повышения их энергетической эффективности путем совершенствования конструктивного оформления проточной части можно считать практически решенной, то для турбин с малыми размерами проточной части, высокими частотами вращения и недостаточным для полного подвода газа к рабочему колесу эта задача до сих пор не потеряла своей актуальности. Решение ее актуально не только в области малых турбин, но и может поспособствовать в поиске вариантов на пути совершенствования полноразмерных турбин путем применения классического метода теории подобия или его инженерной интерпретации, применительно к турбинным ступеням, изложенной в работе [1] и дающей возможность определения параметров моделей турбинных ступеней для исследования газодинамических процессов в проточной части турбин без учета неконтролируемого теплообмена с внешней средой.

Актуален вопрос энергетической безопасности государства и энергопотребляющих регионов [2-5], поэтому, кроме объектов транспортной энергетики, турбины, относящиеся к разряду микротурбин (малоразмерных, малорасходных), применяют в качестве привода генераторов для мобильных электростанций. Это позволяет решить ряд проблем обеспечения энергетической безопасности в случае перебоев в электроснабжении объектов различного уровня и назначения.

Актуальность изысканий подтверждается активной работой в этом направлении сотрудников ДВФУ и их многочисленными публикациями результатов исследований. В работах [6-8] приведены итоговые результаты, связанные с изучением энергетической эффективности турбинных ступеней с новой конструкцией проточной части сопел при практически полном подводе газа к рабочему колесу (РК). Результаты показали перспективность проведения научных изысканий в направлении совершенствования энергетической характеристики малорасходных турбинных ступеней. В работе [9] приведена математическая модель, позволяющая определять параметры газа в области между РК и сопловым аппаратом (СА) при изменении режима работы вышеуказанной ступени.

В работе [10] приведена информация об использовании нового решения в организации натекания газа на входную часть лопаток РК путем частичной интеграции последнего в СА (ступень имела одно сопло). Подробная методика проектирования подобной ступени приведена в работе [11], а результаты оптимизационных исследований в работе [12]. Вышеуказанные работы подтвердили предположение о том, что с целью совершенствования микротурбин необходимо не просто пытаться оптимизировать конфигурацию проточной части из-за малости ее размеров, а идти путем совершенствования самой конструкции с учетом влияния совокупности определяющих эффективность условий.

1. Постановка задач исследования

В технической литературе присутствует большое количество работ, связанных с эффективностью микротурбин (так же – малоразмерные или малорасходные турбины). Однако в настоящее время ощущается дефицит работ, связанных с увеличением эффективности турбин, рассматриваемого типа, путем оптимизации количества и схемы установки сопел с анализом перераспределения потерь кинетической энергии газа при этом.

Исследования проводились на турбинных ступенях, имеющих сопловые аппараты, с углами выхода сопел менее 9° . Это обстоятельство предопределило изготовление лопаток рабочих колес с относительным шагом, значительно превышающим размер, рекомендуемый в технической литературе. Средний диаметр модельных турбинных ступеней составлял 250 мм. Частота вращения ротора при проведении исследований составляла от нуля до 10000 об/мин.

Для получения возможности независимо определять потери кинетической энергии в сопловом аппарате и рабочем колесе экспериментальная установка позволяла выполнять сопловой аппарат с одной степенью свободы (вокруг оси вращения ротора) это давало возможность путем определения крутящего момента вычислять реактивную силу потока газа при выходе его из сопел.

За рабочим колесом было установлено вспомогательное колесо, имеющее подвижность относительно оси турбинной ступени. Проточная часть этого колеса была выполнена таким образом, что поток газа выйдя из каналов рабочего колеса попадал в каналы вспомогательного колеса и выходил из последнего в строго осевом направлении. Это позволяло путем определения крутящего момента в совокупности с другими измерениями определять газодинамические характеристики потока газа при выходе его из каналов рабочего колеса.

Для определения эффективности использования кинетической энергии в работе использовались коэффициент скорости СА (φ_Σ) и коэффициент скорости РК (ψ_Σ). Эти коэффициенты, являющиеся газодинамическими характеристиками потока, представляют собой отношение реальной скорости потока на выходе из СА для φ_Σ и на выходе из РК ψ_Σ к теоретически возможной скорости газа в выходном сечении рассматриваемого элемента ступени.

Возможность получения газодинамических характеристик потока не только в области между сопловым аппаратом и рабочим колесом, но также за РК присутствует благодаря наличию устройства, позволяющего измерять момент количества движения потока газа в окружном направлении на выходе из РК. Это позволило вычислить коэффициенты скорости соплового аппарата и рабочего колеса.

2. Анализ результатов

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса.

На рис. 1 представлены экспериментально полученные данные, из которых видно, что при увеличении характеристического числа (U/C_Φ , где: U – окружная скорость РК на среднем диаметре ступени; C_Φ – теоретическая скорость потока, вычисленная по параметрам газа до сопел СА и за ступенью) коэффициент φ_Σ снижает свое значение. Снижение коэффициента скорости соплового аппарата наблюдается и при полном подводе газа к лопаткам рабочего колеса, причем очень часто его снижение составляет основную долю потерь кинетической энергии потока газа в турбинной ступени. Необходимо учитывать то, что степень влияния уровня энергетической эффективности соплового аппарата на КПД турбинной ступени в целом значительно превышает степень влияния энергетической эффективности рабочего колеса.

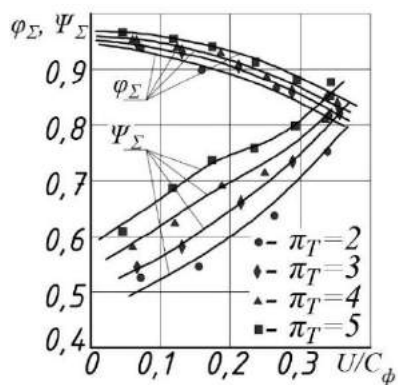


Рис. 1. Коэффициенты скорости СА и РК при различных режимах работы ступени

Такой характер зависимости можно объяснить влиянием кромки лопаток рабочего колеса на условия для потока при выходе последнего из сопел. В то же время увеличение значения характеристического числа приводит к росту эффективности рабочего колеса. Аналогичный характер наблюдается при увеличении отношения давления торможения перед соплами соплового аппарата к статическому давлению за ступенью, т.е. за рабочим колесом – $\pi_T = P_0^*/P_2$. Это связано с уменьшением относительной скорости потока на входе в межлопаточные каналы РК, и как следствие, с меньшей скоростью обтекания лопаток.

Кроме того, изменение окружной скорости РК приводит к изменению параметров потока в области перед рабочим колесом, что приводит к изменению углов выхода потока из сопел СА (α_1) и углов натекания потока на кромки рабочих лопаток РК (угол атаки – $\beta_{1л} - \beta_1$, где $\beta_{1л}$ – угол установки лопаток РК, β_1 – угол натекания потока на кромки лопаток РК) (рис. 2). Видно, что рост угла α_1 приводит к росту угла β_1 , что снижает угол атаки на входе в межлопаточные каналы рабочего колеса.

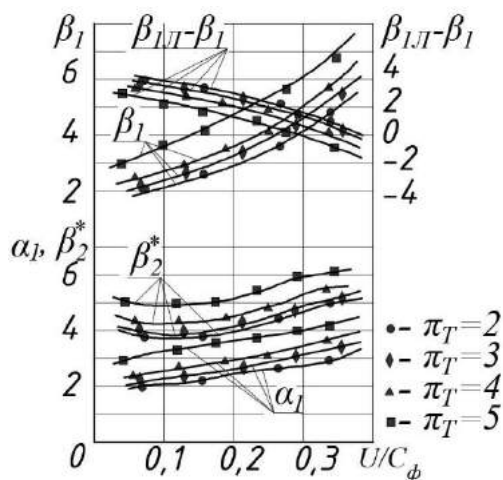


Рис. 2. Углы потока в осевом зазоре и при выходе из РК при различных режимах работы ступени

Кроме того, увеличение характеристического числа приводит к повышению степени реактивности [5], что положительно сказывается на обтекания лопаток РК. Кроме величин U/C_{ϕ} и π_T на значения φ_{Σ} и Ψ_{Σ} оказывает влияние и степень парциальности

соплового аппарата (ε) (рис. 3). Уменьшение ε приводит к некоторому уменьшению φ_{Σ} из-за уменьшения величины активной дуги приводящее к росту краевых потерь. С увеличением π_T эта доля потерь возрастает, что приводит к более интенсивному снижению коэффициента скорости соплового аппарата.

Механизм появления краевых потерь можно объяснить растеканием потока газа на краях активных дуг сопловых аппаратов. Кроме того, вращающиеся лопатки РК затягивает пассивный газ в область активного участка, что создает дополнительное отрицательное влияние на сверхзвуковой поток при выходе последнего из сопел. На выходном участке активной дуги наблюдается разряжение, вызванное эжекцией пассивного газа потоком газа, выходящим из сопел в добавок к нестационарному воздействию движущихся в окружном направлении рабочих лопаток. В связи с этими явлениями сопла работают на нерасчетных режимах. На рис. 3 представлены экспериментально полученные данные о различии в значениях коэффициента скорости соплового аппарата при разных количествах активных дуг ($i = 1$ и $i = 3$).

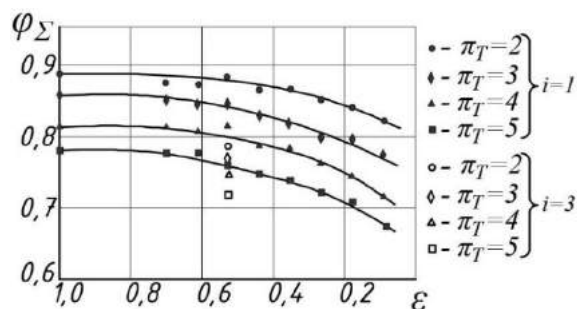


Рис. 3. Коэффициент скорости соплового аппарата при различных значениях ε и π_T

На рис. 4 представлены экспериментально полученные данные о различии в значениях коэффициента скорости рабочих колес при разном количестве активных дуг ($i = 1$ и $i = 3$).

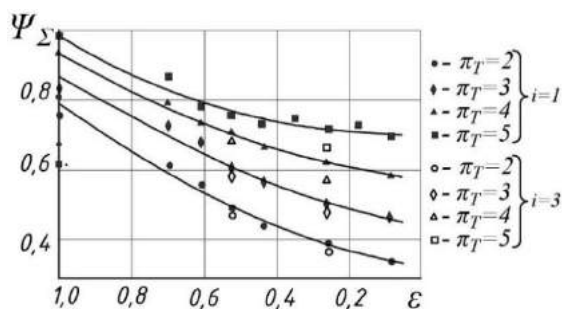


Рис. 4. Коэффициент скорости рабочего колеса при различных значениях ε , π_T и количества дуг подвода газа к РК

Из рис. 4 следует, что на коэффициент скорости рабочего колеса количество активных дуг подвода воздуха влияние практически не оказывают (разница между значениями в пределах погрешности проведенного эксперимента), в отличие от коэффициента скорости соплового аппарата, для которого это влияние велико.

Необходимо отметить, что в применяемом подходе потери на вентиляцию газа лопатками рабочих колес выделяют в отдельную группу потерь, поэтому их влияние не выделяют в чистом виде на потери в каналах РК.

Аналогично выделяют потери на краях активной дуги, однако эти потери через изменение параметров газа в зазоре приводят к изменению условий обтекания лопаток рабочего колеса.

Потери кинетической энергии потока газа при неустановившемся режиме течения в крайних каналах рассматривают как потери от смешения активной струи выходящей из сопел СА с пассивным газом в области между сопловым аппаратом и рабочим колесом. Негативное воздействие вышеуказанного явления усугубляется воздействием вращающихся рабочих лопаток турбинного колеса, кромки которых приводят в хаотическое движение пассивный газ, находящийся в области между сопловым аппаратом и рабочим колесом.

Увеличение дуг подвода газа к лопаткам рабочего колеса приводит к увеличению дополнительных потерь, указанных выше. Однако, экспериментальные данные, полученные для ступеней с большим относительным шагом лопаток РК, показали, что увеличение дуг подвода в меньшей степени влияет на потери в межлопаточных каналах рабочего колеса, чем введение парциальности даже с одной дугой подвода. Это указывает на то, что в длинных каналах таких рабочих колес, указанный процесс смешения не происходит до конца при увеличении числа дуг (по крайней мере, до 3-х) и не приводит к значительному ухудшению обтекания профилей лопаток рабочих колес.

На рис. 5 представлена экспериментально полученная зависимость изменения потерь кинетической энергии потока газа в рабочем колесе при различной степени парциальности и режимах работы ступени при нулевом угле атаки. Характер

зависимости остается примерно одинаковым, однако, уменьшение парциальности приводит к значительному повышению уровня потерь кинетической энергии потока, что связано со значительным изменением кинематики потока при обтекании лопаток рабочего колеса.

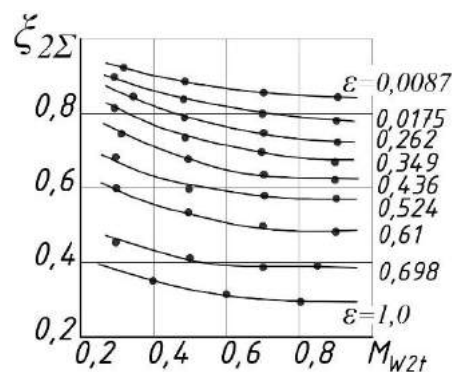


Рис. 5. Изменение потерь кинетической энергии потоком газа в межлопаточных каналах рабочего колеса в зависимости от M_{W2t} и степени парциальности при нулевом угле атаки

Заключение

Результаты экспериментального исследования показали, что введение парциального подвода газа к лопаткам рабочего колеса оказывает негативное влияние на коэффициенты скорости рабочего колеса гораздо сильнее, чем увеличение количества дуг подвода.

Что же касается соплового аппарата то для него негативное влияние парциальности меньше, чем в случае увеличения количества дуг подвода газа к рабочему колесу.

Наличие этого явления необходимо учитывать при проектировании типа турбин, рассмотренного в статье.

Литература

1. Фершалов Ю. Я. Методика физического моделирования газодинамических процессов в проточных каналах турбомашин Российская авиация, 2012, 55(4), С. 424-429
2. Сендеров С.М. Модельно-индикативный подход к оценке уровня энергетической безопасности страны при различных вариантах развития энергетики // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2005. № 4. С. 3-9.
3. Сендеров С. М., Еделев А. В. Формирование перечня критически важных объектов газотранспортной системы России с точки зрения энергетической безопасности // Энергетика. 2019. Т. 184. С. 105-112
4. Сендеров С. М., Рабчук В. И., Воробьев С. В., Смирнова Е. М., Юсифбейли Н. А., Гусейнов А. М., Насибов В. К., Гулиев Х. Б. Геополитические особенности энергетической безопасности прикаспийских регионов России и Азербайджана // Геополитика энергетики. 2019. Т. 41. № 1.С. 5-12.
5. Сендеров С. М., Воробьев С. В. Подходы к идентификации критических объектов и критических комбинаций объектов газовой промышленности с точки зрения их работоспособности // Надежность и безопасность систем. 2020. Т. 203. С. 107046.
6. Фершалов Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // дисс. докт. техн. наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, ДВФУ, 2015, с. 355
7. Фершалов Ю. Ю., Фершалов А. Ю., Фершалов М. Ю. Микротурбина с новой конструкцией сопел // Энергетика, 2018, 157, С. 615-624
8. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Фершалов М.Ю. Эффективность малогабаритных турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 57-62.
9. Фершалов М. Ю., Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Ю., Сазонов Т. В., Ибрагимов Д. И. Степень реактивности микротурбин Прикладная механика и материалы, 2014, 635-637, С. 354-357
10. А. Ю. Фершалов, Ю. Я. Фершалов, М. Ю. Фершалов Принципы проектирования ступеней газовых микротурбин // Энергетика 218 (2021) 119488 DOI – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119488>

11. Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Методика проектирования ступеней осевых микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 54-58.
12. Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Оптимизация энергетической эффективности ступеней осевой микротурбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 59-63.

References

1. Fershalov Yu.Ya. Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages Russian Aeronautics, 2012, 55(4), P. 424-429.
2. Senderov S. M. Model-indicative approach to assessing the level of energy security of the country in various variants of energy development // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Power engineering. 2005. No. 4. pp. 3-9.
3. Senderov S.M., Edelev A.V. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security // Energy. 2019. T. 184. C. 105-112.
4. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Vorobev S.V., Smirnova E.M., Yusifbeyli N.A., Huseynov A.M., Nasibov V.K., Guliyev H.B. Geopolitical features of energy security in the Caspian regions of Russia and Azerbaijan // Geopolitics of Energy. 2019. T. 41. № 1. C. 5-12.
5. Senderov S.M., Vorobev S.V. Approaches to the identification of critical facilities and critical combinations of facilities in the gas industry in terms of its operability // Reliability Engineering & System Safety. 2020. T. 203. C. 107046.
6. Fershalov Yu.Ya. Modeling, analysis, and improvement of the gas-dynamic characteristics of the marine supersonic low flow axial turbines. Vladivostok: Dokt. Diss. Far Eastern Federal University; 2015. p. 355.
7. Fershalov Y.Y., Fershalov A.Y., Fershalov M.Y. Microturbine with new design of nozzles // Energy, 2018, 157, P. 615-624
8. Fershalov Andrey Yu; Fershalov Yuriy Ya; Fershalov Mikhail Yu Efficiency of the small-sized turbine stages with small outlet angle of nozzles of science // Marine Intellectual Technologies 2018. № 1-1 (39). P. 57-62.
9. Fershalov M.Y., Fershalov M.Y., Fershalov Y.Y., Sazonov T.V., Ibragimov D.I. Microturbines degree of reactivity Applied Mechanics and Materials, 2014, 635-637, P. 354-357
10. A.Yu Fershalov, Yu.Ya Fershalov, M.Yu Fershalov Principles of designing gas microturbine stages // Energy 218 (2021) 119488 DOI – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119488>
11. Yurtaev, Aleksandr A.; Fershalov, Andrey Y.; Fershalov, Yuri Ya.; Porshkevich, Viktor V. Methodology for design of axial-flow microturbine stages with partial integration of the impeller into the nozzle blade cascade // Marine Intellectual Technologies. 2019. № 3-3 (45). P. 54-58.
12. Yurtaev, Aleksandr A.; Fershalov, Andrey Y.; Fershalov, Yuri Yakovlevich; Porshkevich, Viktor V. Energy efficiency optimization of axial-flow microturbine staging with partial integration of impeller into nozzle blade cascade // Marine Intellectual Technologies 2019. № 3-3 (45). P. 59-63.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Васильевич Соломахин, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных процессов и технологий. Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя 41, e-mail: y.solomahin@mail.ru

Yuriy V. Solomakhin, Ph.D. (Eng.), the assistant professor of department of transport processes and technologies, Vladivostok State University Economics and Service, Gogolya str. 41, Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: y.solomahin@mail.ru

Людмила Петровна Цыганкова, доцент кафедры судовой энергетики и автоматики, Дальневосточный Федеральный Университет, 690922, Приморский край, остров Русский, п. поселок Аякс, 10, e-mail: tsygankova.lp@dvfu.ru

Lyudmila P. Tsigankova, The assistant professor of department of ship power engineering and automation, Far Eastern Federal University, The village of Ajax, 10, Russky Island, Primorsky Territory, 690922, Russian Federation, e-mail: tsygankova.lp@dvfu.ru

Коршунов Виктор Николаевич, доцент кафедры судовой энергетики и автоматики, Дальневосточный Федеральный Университет, 690922, Приморский край, остров Русский, п. поселок Аякс, 10, e-mail: korshunov.vn@dvfu.ru

Viktor N. Korshunov, The assistant professor of department of ship power engineering and automation, Far Eastern Federal University, The village of Ajax, 10, Russky Island, Primorsky Territory, 690922, Russian Federation, e-mail: korshunov.vn@dvfu.ru

Поступила в редакцию: 21.05.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.8, 004.9

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.043>**Анализ временных рядов – скоростей и направлений ветра с помощью моделей нейронных сетей и задачи классификации**Д.Н. Кобзаренко¹, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН

Аннотация. В работе приводятся результаты анализа временных рядов – скоростей и направлений ветра в региональном масштабе с использованием моделей нейронных сетей и задачи классификации на основе данных четырех метеорологических станций, расположенных на территории Республики Дагестан. В качестве исходных данных взяты временные ряды за период 2011-2020гг с частотой измерений 8 раз в сутки. Цель работы заключается в изучении закономерностей во временных рядах на основе результатов машинного обучения в задаче классификации. В рамках поставленной цели решаются задачи: спроектировать модели нейронных сетей для классификации метеорологической станции на основе данных скоростей и направлений ветра (вместе и по отдельности); добиться максимально возможной точности предсказания через настройку глобальных параметров; выполнить серию экспериментов по моделированию и оценить результаты.

В результате выполнения экспериментов получены зависимости точности классификации от размера блока данных, которые позволяют сделать вывод о минимальном размере блока данных во временном ряде, обеспечивающем точности близкие к максимально возможным. Также установлено и показано, что ошибки классификации модели нейронных сетей явно коррелируют с географическим положением метеорологических станций. По распределению ошибок классификации во временном интервале, установлено, что меньше всего ошибок имеется в весенний период, больше всего – в летний. В целом у расположенных на морском побережье метеорологических станций ошибок классификации больше, что говорит о меньшей уникальности ветрового режима в этих районах.

Результаты работы также позволяют сделать общий вывод о том, что нейронные сети могут использоваться не только как инструмент прогноза, распознавания или классификации, но и как инструмент, позволяющий давать аналитическую оценку исходным данным – временным рядам.

Ключевые слова: Скорость ветра, направление ветра, анализ данных, искусственный интеллект, нейронная сеть, временной ряд, полносвязный слой, задача классификации.

Analysis of time series – wind speeds and wind directions using neural network models and classification taskDmitry N. Kobzarenko¹, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru¹Institute for Geothermal and Renewable Energy Research – Branch of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation

Abstract. The paper presents the analytics results of time series – wind speeds and wind directions on a regional scale using neural network models for the classification task based on data from four meteorological stations located on the territory of the Republic of Dagestan. Time series for the period 2011-2020 were taken as the initial data with a frequency of measurements 8 times a day. The purpose of the work is to study patterns in time series based on the results of machine learning in the classification task. Within the framework of this purpose, the following tasks are being solved: to develop neural network models for the classification of a meteorological station based on data of wind speeds and wind directions (together and separately); to achieve the highest possible prediction accuracy by adjusting the global parameters; to run a series of simulation experiments and evaluate the results.

As a result of the experiments, the dependences of the classification accuracy on the data block size were obtained, which allow us to conclude about the minimum size of the data block in the time series, which provides the accuracy close to the maximum possible. It was also found and shown that classification errors of the neural network model clearly correlate with the geographical location of meteorological stations. According to the distribution of classification errors in the time interval, it was found that the least number of errors is in the spring period, and most of all – in the summer ones. In general, the meteorological stations located on the sea coast have more classification errors, which indicates a lesser uniqueness of the wind dynamics in these regions.

The paper results also allow us to draw a general conclusion that neural networks can be used not only as a forecasting, recognition or classification tool, but also as a tool that allows an analytical assessment of the time series data.

Key words: Wind speed, wind direction, data analysis, artificial intelligence, neural network, time data series, dense layer, classification task.

Введение

В современных научных исследованиях и разработках искусственный интеллект, в большинстве своем представленный моделями нейронных сетей, занимает свою нишу инструмента решения группы задач, в том числе и для прогнозирования ветроэнергетических параметров

[1, 2, 3, 4]. Как правило это задачи регрессии, прогноза, классификации, генерации новых данных на основе шаблонов, поиск выбросов в данных и т.д. Вместе с тем, модели нейронных сетей можно использовать не только для решения задач с классической формулировкой, где имеются исходные данные и требуется получить конечный результат с требуемой точностью, но также

выполнять научные исследования, которые дают ответы на поставленные вопросы о свойствах массивов данных. Одним из возможных вариантов таких исследований является текущая работа, посвященная анализу временных рядов – скоростей и направлений ветра с помощью нейронных сетей, и задачи классификации.

Актуальность исследований данных мониторинга ветра обуславливается высоким интересом к освоению возобновляемых источников энергии. Энергия ветра может быть использована как отдельно, так и в комплексе с другими источниками, например, солнечной [5]. Основной энергетической характеристикой ветра является скорость, но и направление ветра также является важным параметром, поскольку влияет на ориентацию ветроэнергетической установки и ее КПД при вращении.

Для реализации исследований подготовлена база данных, сгенерированная на основе наблюдений от четырех метеорологических станций, расположенных на территории Республики Дагестан. Названия станций, как и их географическое положение совпадает с названиями соответствующих населенных пунктов (рис. 1). Станция «Кочубей», расположена в северной равнинной части Дагестана, станция «Ахты» – в южной горной части. Станции «Махачкала» и «Дербент» располагаются на побережье Каспийского моря. Таким образом, охвачены, практически все географические зоны региона, за исключением юго-западной горной части (в этой зоне пока проблематично получить качественный исходный материал для исследования).



Рис. 1. Географическое расположение станций метеорологических наблюдений

Цель работы заключается в изучении закономерностей в данных как во времени, так и в

пространстве в региональном масштабе с помощью моделирования нейронных сетей.

В рамках поставленной цели решаются задачи:

- спроектировать модели нейронных сетей для предсказания метеорологической станции на основе данных скоростей и направлений ветра (вместе и по отдельности);

- добиться максимально возможной точности предсказания через настройку глобальных параметров;

- выполнить серию экспериментов, оценить и проанализировать их результаты.

Проведение экспериментов с моделями нейронных сетей позволяет ответить на следующие вопросы исследования:

- насколько хорошо нейронная сеть распознает принадлежность данных метеорологической станции?

- для какого параметра распознавание лучше для скорости ветра или направления?

- какие временные интервалы данных, (далее по тексту называемые **размером блока данных**), являются оптимальными для распознавания?

- какие метеорологические станции распознаются лучше, какие хуже?

- как коррелируются ошибки распознавания с географическим и относительным расположением метеорологической станции?

Информация, полученная в результате проведенных экспериментов, имеет также большую ценность при решении прогнозных задач на основе тех же нейронных сетей. Она существенно расширяет знания об объекте исследования при прогнозе.

Текущая работа является продолжением исследования [6], в котором показаны сезонные изменения частотных характеристик временных рядов Приморского Дагестана.

1. Инструментарий и подготовка данных

В настоящее время существует множество готовых инструментов для моделирования нейронных сетей, которые можно применить для реализации поставленных задач. В работе используется один из таких популярных и практичных инструментов – библиотека Keras для языка программирования Python. Keras является надстройкой высокого уровня над базовой библиотекой работы с нейронными сетями Tensorflow и позволяет с меньшими временными затратами создавать модели на Python.

В качестве среды программирования используется облачный ресурс Google Colaboratory, который на основе Google-аккаунта предоставляет возможность выполнять всю работу в интернет-браузере и там же выводить и сохранять результаты. Кроме того, в Google Colaboratory имеется возможность подключения графического ускорителя при обучении нейронной сети, что намного ускоряет этот процесс. Поэтому, для выполнения работы нет необходимости использовать дополнительное программное обеспечение.

Исходные данные представляют собой набор файлов текстового формата со структурированными данными. Каждый текстовый файл содержит данные метеорологических наблюдений за календарный месяц. Частота наблюдений – восемь раз в сутках в

равномерных временных интервалах (часы:минуты): 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00.

Данные охватывают временной период 2011-2020гг. Каждая метеорологическая станция представлена набором из 120 файлов за 10 лет. Первая инженерная задача состоит в том, чтобы объединить данные в единую таблицу. Для ее решения написан Python-скрипт. В результате работы скрипта исходные данные преобразовываются в табличный формат библиотеки Pandas. Для удобства извлечения информации из таблицы формируется временной индекс. После преобразования, готовый для дальнейшей работы результат сохраняется в популярный открытый формат CSV.

Следующим шагом является подготовка выборки данных для моделирования. Общая выборка представляет собой n-мерные массивы, где последнее измерение определяет количество блоков данных. В моделях нейронных сетей принято разделять выборку на обучающую, проверочную и тестовую. Обычно 80% отводится на тестовую выборку и по 10% на остальные. В данном случае принято решение формировать выборки по временным периодам: для обучающей выборки берется временной период 2011-2017гг., для проверочной выборки – 2018г. и для тестовой выборки 2019-2020гг. Такой подход к формированию выборки исключает перемешивание данных, которое неизбежно приведет к их разбалансировке (например, данных по зиме или весне, в обучающей выборке может оказаться больше, чем по другим временам года), что не приемлемо для рассматриваемой задачи.

Следующий шаг состоит в определении элементов массивов выборки. Для этого вводится понятие **размера блока данных**. Под размером блока данных понимается последовательность измерений, которая уместится во временной интервал, измеряемый в сутках. Например, размер блока данных равный 3 суткам означает, что в нем содержатся $3 * 8 = 24$ измерений.

Входными данными модели являются: X1 – скорость ветра, X2 – направление ветра, Y – индекс метеорологической станции. Для представления данных в нейронной сети обычно их принято либо нормировать, либо представить в формат one hot encoding (ONE). Представление данных в ONE подходит как для значений скорости ветра, так и для значений направления ветра. Анализ всей базы данных показывает, что скорости ветра представлены диапазоном 0-19м/с. Поэтому для представления скорости ветра в ONE достаточно использовать вектор из 20 элементов. Для направления ветра значения из диапазона угла в 0-359 градусов приводятся к значениям розы ветров, состоящей из 16 лепестков и представляются в ONE вектором из 16 элементов. Индекс метеорологической станции также переводится в ONE из 4 элементов (по количеству станций). Например, для размера блока данных равного 2 суткам получают следующие размеры векторов:

- для X1 – $20 * 2 * 8 = 320$ элементов;
- для X2 – $16 * 2 * 8 = 256$ элементов;
- для Y – 4 элемента.

2. Модели нейронных сетей

Для построения моделей нейронных сетей в Keras использован подход функционального программирования, который позволяет строить параллельные ветви.

Предусмотрены две модели: первая (модель A) для одного входа X – либо для скорости, либо для направления ветра (рис. 2), вторая (модель B) – для двух входов X1 и X2 (рис. 3). В моделях преимущественно использованы dense-слои (полносвязные), а также dropout-слои (отключающие нейроны) для предотвращения переобучения.

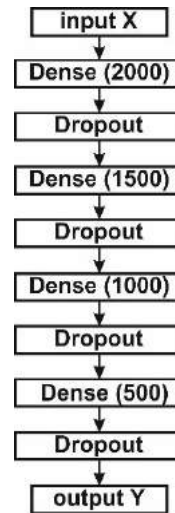


Рис. 2. Нейронная сеть (модель A)

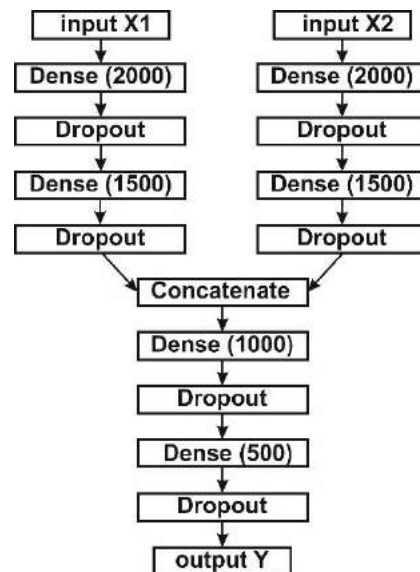


Рис. 3. Нейронная сеть (модель B)

Архитектуры нейронных сетей (рис. 2 и рис. 3) получены на основе серии экспериментов с конфигурации слоев и их комбинаций. Дальнейшее наращивание каскадов слоев или количества нейронов не приводят к увеличению точности при обучаемости моделей.

Поскольку проектируемые нейронные сети решают задачу классификации, то в качестве ошибки при обучении принята функция categorical crossentropy.

Экспериментальным путем подобраны оптимальные глобальные параметры для обучения моделей. Они представляют собой следующие значения:

- batch_size (размер батча) = 40;
- процент отключения нейронов в dropout = 10%;
- функция активации для слоев = Relu;
- learning_rate (шаг обучения) = 0.000005;
- количество эпох обучения = 50.

Для выполнения экспериментов с моделями разработаны коллбэки (CallBacks). Суть работы коллбэков состоит в том, чтобы для очередной эпохи рассчитать среднее арифметическое значение от точности на проверочной и тестовой выборках, а для лучшей точности сохранить веса модели.

3. Эксперименты с моделями

3.1. Зависимость точности предсказания от размера блока данных

Для получения зависимости точности предсказания от размера блока данных, значения последнего для подачи в модели варьировались в пределах от 1 до 28 суток. В результате получены значения точностей предсказания на тестовой выборке (2019-2020гг.) как общие, так и для отдельных станций.

На рис. 4 показаны зависимости точности предсказания модели А от размера блока данных, если на вход модели X подавать только данные по скорости ветра. Здесь наблюдается картина большой нестабильности в результатах прогноза. Наилучшим образом идентифицируются данные станции «Кочубей». Кривая зависимости для этой станции находится выше кривой общей точности. Точность лучшего общего прогноза составляет около 74%. Худшие и нестабильные показатели прогноза демонстрируют данные станции «Махачкала». В диапазоне значений размера блока данных от 1 до 12 суток наблюдается рост точности прогноза. При размере блока данных равном 12 суток общая точность классификации достигает значений близких к максимально возможным. При дальнейшем увеличении размера блока данных точность меняется то в лучшую, то в худшую сторону.

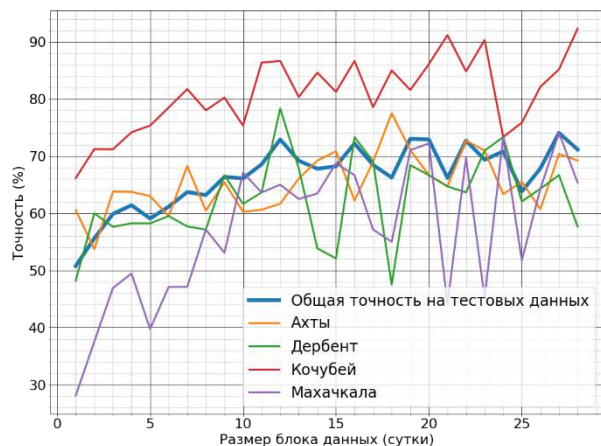


Рис. 4. Зависимость точности на тестовой выборке от размера блока данных только для скорости ветра

На рис. 5 продемонстрированы результаты эксперимента для модели А, если на вход X подаются только данные по направления ветра. Они

показывают, что прогноз для данных по направлению ветра намного точнее, чем на данных по скорости ветра. Здесь наиболее стабильные результаты в районе 100% демонстрируют временные ряды станций «Ахты» и «Дербент». Точность идентификации данных станции «Кочубей» также в среднем достигает высоких пределов под 100%. Для данных станции «Махачкала» ситуация с прогнозом, также, как и в случае со скоростью ветра (рис. 4) – точность остается низкой на уровне 65%.

Близко к максимально возможным значениям общая точность для направления ветра достигает при значении размера блока данных в 9 суток.

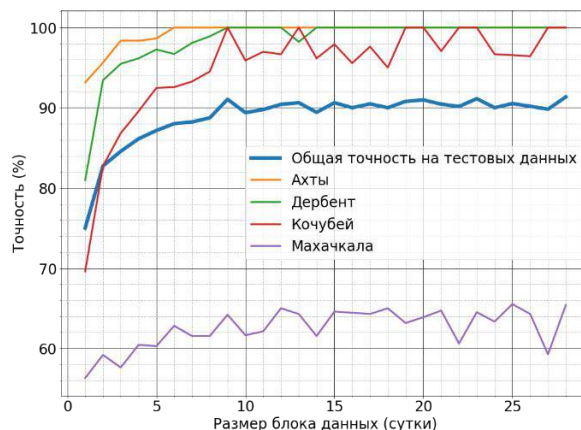


Рис. 5. Зависимость точности на тестовой выборке от размера блока данных только для направления ветра

На рис. 6 продемонстрированы результаты эксперимента для модели В. На вход X1 подаются данные скорости ветра, на вход X2 – данные направления ветра. Здесь можно наблюдать немного улучшенный вариант общего прогноза на основе данных только направления ветра (рис. 5). Из диаграммы (рис. 6) видно, что и в случае модели на основе комплексных данных идентификация станции «Махачкала» существенно отличается в худшую сторону по сравнению с другими, с точностью, не превышающей 70%.

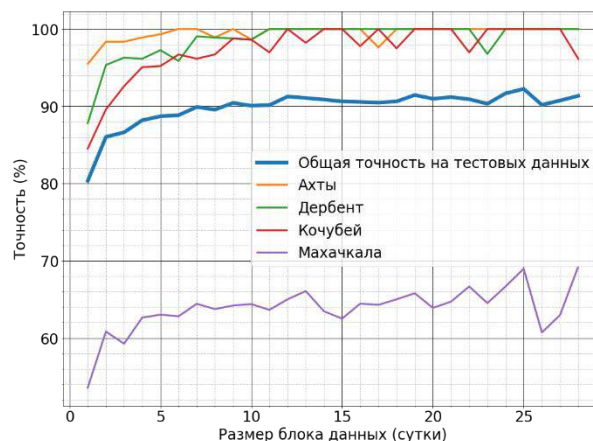


Рис. 6. Зависимость точности на тестовой выборке от размера блока данных для скорости и направления ветра

В результате экспериментов (рис. 4-6) установлено следующее:

- временные ряды направлений ветра гораздо лучше классифицируются нейронной сетью, чем временные ряды скоростей ветра;
- результаты классификации данных метеорологической станции «Махачкала», контрастируют с другими – они имеют существенно низкий процент точности;
- размер блока данных для оптимальной точности классификации должен составлять не менее 12 суток для скорости ветра и не менее 9 суток для направления ветра.

3.2. Взаимосвязь ошибок классификации с географическим положением метеорологических станций

Суть экспериментов – посмотреть на ошибки классификации в данных, чтобы сопоставить их с относительным расположением метеорологических станций и их географическими особенностями (рис. 1). Для этого берется фиксированное значение размера блока данных, обучается нейронная сеть и на тестовых данных выводится перечень ошибочных классификаций.

Для первого эксперимента обучена нейронная сеть модели А на данных только по скорости ветра. Установлен размер блока данных равный 12 суткам. Результаты приведены на рис. 7.

Результаты первого эксперимента показывают, что в ошибках классификации нейронной сети явно присутствуют географические особенности расположения метеорологических станций. Несложно оценить, что в подавляющем большинстве ошибок классификации нейронная сеть дает название метеорологической станции, которая находится на ближайшем расстоянии к правильной.

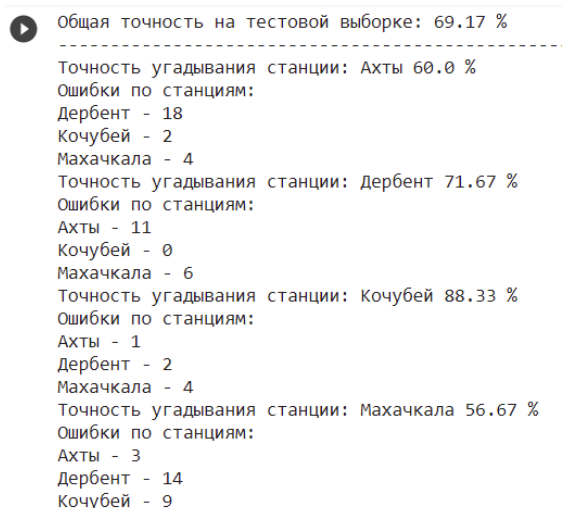


Рис. 7. Результаты классификации станций с раскладом ошибок для данных скорости ветра (скриншот блокнота Google Colaboratory)

Для второго эксперимента обучена нейронная сеть модели А на данных только по направлению ветра. Установлен размер блока данных равный 9 суткам. Результаты эксперимента приведены на рис. 8.

Результаты второго эксперимента показывают, что ошибок классификации по метеорологическим станциям «Ахты» и «Дербент» нет, по станции «Кочубей» их всего 2, а самую проблемную с точки

зрения классификации станцию «Махачкала» нейронная сеть часто путает со станцией «Дербент», которая является ближайшей и также расположена на берегу Каспийского моря (рис. 1).

Представленные результаты двух экспериментов классификации показывают то, что и скорость ветра (в меньшей степени) и направление ветра (в большей степени) в своих данных содержат информацию в привязке к географическому расположению.

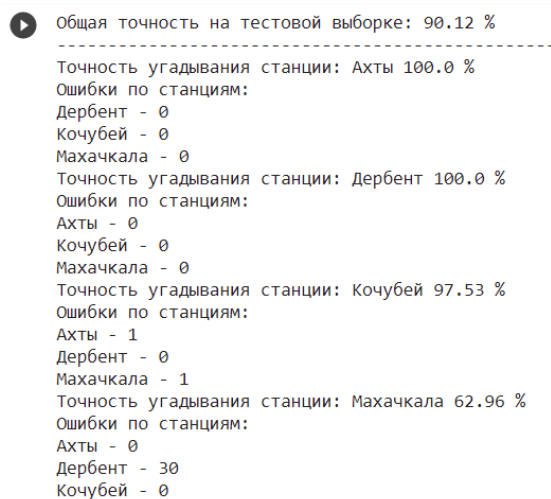


Рис. 8. Результаты классификации станций с раскладом ошибок для данных направления ветра (скриншот блокнота Google Colaboratory)

3.3. Распределение ошибок классификации по временному интервалу

В данном аспекте интересным является выяснить равномерно ли распределены ошибки классификации по интервалу временного периода 2019-2020гг, либо здесь имеются свои особенности, возможно, существуют зависимости от времен года.

Для этого ставятся следующие эксперименты (отдельно для данных скорости ветра и отдельно для направления). Размер блока данных устанавливается равным 9 суток. После обучения нейронной сети тестовые данные разделяются по месяцам (на каждый месяц выходит по 3 девятидневных блока). В результате прогона через модель по каждому календарному месяцу выдается ответ классификации исходя из станции, которая определилась более 1 раза. Если все 3 блока классифицировались, как различные, то выдается ответ – «не определено».

Результаты экспериментов занесены в табл. 1 для данных скоростей ветра и табл. 2 для данных направлений ветра.

Таблица 1

Ошибки классификации станций по временам года для данных скоростей ветра за 2019-2020гг.

Время года	Ахты	Дербент	Кочубей	Махачкала
Зима	1	3	2	2
Весна	1	1	1	2
Лето	5	2	0	3
Осень	1	3	1	3

Табл. 1 демонстрирует отсутствие общих закономерностей по ошибкам классификации для всех метеорологических станций. Следует отметить, что весенний период в целом характеризуется минимумом ошибок, а летний – максимумом. Станция «Ахты» особенно плохо классифицируется в летний период. Больше всех ошибок приходится на метеорологические станции «Дербент» и «Махачкала», находящиеся на берегу Каспийского моря, при этом основная их часть – взаимная.

Таблица 2

Ошибки классификации станций по временам года для данных направлений ветра за 2019-2020гг.

Время года	Ахты	Дербент	Кочубей	Махачкала
Зима	0	0	0	1
Весна	0	0	0	2
Лето	0	0	0	3
Осень	0	0	0	3

Ситуация с данными по направлению ветра (табл. 2) отличается в сторону отсутствия ошибок, что следовало также из предыдущих результатов экспериментов. Ошибки классификации присутствуют только для метеорологической станции «Махачкала». Расшифровка ошибок по месяцам дает довольно неожиданный результат (рис. 9).

```

/usr/local/lib/python3.7/dist-packages/ipykernel_launcher.py
январь 2019 | Махачкала | Махачкала |
февраль 2019 | Махачкала | Махачкала |
март 2019 | Махачкала | Махачкала |
апрель 2019 | Махачкала | Махачкала |
май 2019 | Махачкала | Махачкала |
июнь 2019 | Махачкала | Махачкала |
июль 2019 | Махачкала | Махачкала |
август 2019 | Махачкала | Махачкала |
сентябрь 2019 | Махачкала | Махачкала |
октябрь 2019 | Махачкала | Махачкала |
ноябрь 2019 | Махачкала | Махачкала |
декабрь 2019 | Махачкала | Махачкала |
январь 2020 | Махачкала | Махачкала |
февраль 2020 | Махачкала | Махачкала |
март 2020 | Махачкала | Махачкала |
апрель 2020 | Махачкала | Дербент |
май 2020 | Махачкала | Дербент |
июнь 2020 | Махачкала | Дербент |
июль 2020 | Махачкала | Дербент |
август 2020 | Махачкала | Дербент |
сентябрь 2020 | Махачкала | Дербент |
октябрь 2020 | Махачкала | Дербент |
ноябрь 2020 | Махачкала | Дербент |
декабрь 2020 | Махачкала | Дербент |
    
```

Рис. 9. Результаты классификации для станции «Махачкала» с раскладом ошибок по месяцам для данных направления ветра (скриншот блокнота Google Colaboratory)

Рис. 9 демонстрирует наличие девятимесячного периода в 2020 году, когда динамика направления ветра в районе Махачкалы очень похожа на динамику направления ветра в районе Дербента. Следует в очередной раз отметить, что оба населенных пункта расположены на берегу Каспийского моря. Особенность географического положения является основной причиной того, что нейронная сеть путает результаты Махачкалы с Дербентом. Однако, объяснить почему это происходит 9 месяцев подряд пока не представляется возможным.

4. Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют оценить степень уникальности данных временных рядов мониторинга ветра в рассматриваемых регионах. Степень уникальности данных определяется точностью классификации. Для направления ветра уникальность данных почти стопроцентная, за исключением схожести в прибрежных районах Махачкалы и Дербента. Для скорости ветра можно говорить о высокой степени уникальности данных, в районе северного равнинного Дагестана (станция «Кочубей»), а также в районе южного горного Дагестана (станция «Ахты»).

Полученные в работе результаты имеют ценное значение при решении и обосновании прогнозной задачи на основе нейронных сетей для этих же районов. Логично предположение о том, что чем выше степень уникальности данных, тем выше достоверность прогноза. Поэтому прогноз в районах метеорологических станций «Ахты» и «Кочубей» можно считать более достоверным. Сложнее всего нейронной сети идентифицировать данные метеорологической станции «Махачкала», поэтому следует с осторожностью относиться и к прогнозу для этого временного ряда.

Также для прогнозирования скорости и направления ветра нужно учитывать размеры блока данных при которых нейронная сеть наилучшим образом их идентифицирует. Для скорости ветра блок данных должен быть не менее 12 суток, а для направления ветра не менее 9 суток. Вместе с тем, экспериментально установлены оптимальные значения размера блока данных при которых нейронная сеть имеет наибольшие точности. Для скорости ветра – это значение равно 27 суткам (рис. 4), для направления ветра – 28 суткам (рис. 5).

Заключение

В результате выполнения экспериментов показано, что нейронные сети с задачей классификации можно использовать в качестве инструмента изучения взаимосвязей объектов через принадлежащие им временные ряды. Использование машинного обучения для классификации метеорологической станции на основе данных скоростей и направлений ветра позволяет установить степени уникальности ветрового режима для районов в привязке к их географическому положению.

Литература

1. Catalão J.P.S., Pousinho H.M.I., Mendes V.M.F. Short-term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform, *Renewable Energy*, no. 36, pp. 1245-1251, 2011.
2. Senthil Kumar P, Daphne Lopez, Forecasting of Wind Speed Using Feature Selection and Neural Networks, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, no. 3, pp. 833–837, 2016.
3. Boubacar Doucoure, Kodjo Agbossou, Alben Cardenas Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data, *Renewable Energy*, no. 92, pp. 202-211, 2016.
4. Матренин П.В., Манусов В.З., Игумнова Е.А. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3 (47). С. 69-80.
5. Мустафаев А.Г. Нейросетевая модель прогнозирования уровня солнечной энергии для задач альтернативной энергетики // Программные системы и вычислительные методы. 2016. № 2. С. 150-157.
6. Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Паштаев Б.Д. Исследование сезонных изменений частотных характеристик скорости и направления ветра в Приморском Дагестане // Юг России: экология, развитие. 2020. Т.15, № 4. С. 152-160.

References

1. Catalão J.P.S., Pousinho H.M.I., Mendes V.M.F. Short-term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform, *Renewable Energy*, no. 36, pp. 1245-1251, 2011.
2. Senthil Kumar P, Daphne Lopez, Forecasting of Wind Speed Using Feature Selection and Neural Networks, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, no. 3, pp. 833–837, 2016.
3. Boubacar Doucoure, Kodjo Agbossou, Alben Cardenas Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data, *Renewable Energy*, no. 92, pp. 202-211, 2016.
4. Matrenin P.V., Manusov V.Z., Igumnova E.A. Ustojchivoe kratkosrochnoe prognozirovaniye skorosti vetra s pomoshch'yu adaptivnykh kompaktnykh nejronnykh setej [Sustainable short-term wind speed prediction using adaptive compact neural networks]. *Problemy regional'noj energetiki*, 2020, No 3 (47), S. 69-80.
5. Mustafaev A.G. Nejrosetevaya model' prognozirovaniya urovnya solnechnoj energii dlya zadach al'ternativnoj energetiki [Neural network model for forecasting solar energy level for alternative energy problems]. *Programmnyye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2016, No 2, S. 150-157.
6. Kobzarenko D.N., Kamilova A.M., Pashtaev B.D. Issledovanie sezonnykh izmenenij chastotnykh harakteristik skorosti i napravleniya vetra v Primorskom Dagestane [Research the seasonal changes in frequency characteristics of wind speed and direction in Coastal Dagestan] *YUg Rossii: ekologiya, razvitie*, 2020, T.15, No 4, S. 152-160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Николаевич Кобзаренко, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединенного института высоких температур РАН, 367030, Махачкала, пр-т Имама Шамиля, 39а, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Dmitry N. Kobzarenko, Dr. Sci. (Eng)s, Leading Researcher, Institute for Geothermal and Renewable Energy Research – Branch of Joined Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Imama Shamilya, 39a, Makhachkala, 367030, Russian Federation, e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.044>

Эффективность пространственно-рекурсивных алгоритмов передачи изображений морских судов

Ш.С. Фахми^{1,2}, e-mail: shakeebf@mail.ru, Н.В. Шаталова¹, e-mail: shatillen@mail.ru,
Е.В. Костикова³, e-mail: kostikova.ev@mail.ru, Н.Ю. Пышкина³, e-mail: pyshkinanady@yandex.ru,
Ю.И. Васильев³, e-mail: yuvas890@gmail.com

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. На современном этапе развития интеллектуальных морских технологий необходимо включить в состав видеосистемы обработки изображений две подсистемы передачи видеоинформации морских сюжетов. Во первых на основе спектрального преобразования сигналов из пространственной области в частотную для оперативной доставки видеоинформации, полученной с различных камер подводного и надводного наблюдения. Во вторых, на основе пространственных методов обработки, без перехода в спектральную область сигнала для передачи выделенных ключевых точек объектов на изображениях. При этом важнейшая особенность этих подсистем заключается в улучшении информационных показателей качества морских видеосистем автоматизированной обработкой видеоинформации: точность визуальных данных, битовая скорость передачи по каналам связи и вычислительная сложность алгоритмов анализа и передачи видеоинформации. В предлагаемом исследовании приводятся алгоритмы спектральной и пространственной обработки видеоинформации, проведена оценка эффективности алгоритмов обработки изображений. А также отражены результаты моделирования алгоритмов и сравнительная оценка информационных показателей интеллектуальных морских видеосистем: точность, битовая скорость и вычислительная сложность видеосистем обработки морских изображений.

Ключевые слова: Интеллектуальные морские видеосистемы, сжатие и восстановление, морские сюжеты, морские суда, коэффициент сжатия, точность, сложность.

Efficiency of spatially recursive algorithms for transmitting images of marine vessels

Shakeeb S. Fahmi^{1,2}, e-mail: shakeebf@mail.ru, Natalia V. Shatalova¹, e-mail: shatillen@mail.ru,
Elena V. Kostikova³, e-mail: kostikova.ev@mail.ru, Nadezhda Y. Pyshkina³, e-mail: pyshkinanady@yandex.ru,
Yuri I. Vasilev³, e-mail: yuvas890@gmail.com

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Abstract. At the present stage of the development of intelligent marine technologies, it is necessary to include two subsystems for the transmission of video information of marine scenes in the video image processing system: 1) based on the spectral conversion of signals from the spatial domain to the frequency domain for the rapid delivery of video information obtained from various underwater and surface surveillance cameras; 2) based on spatial processing methods without switching to the spectral domain of the signal to transmit selected key points of objects in the images. At the same time, the most important feature of these subsystems is to improve the information quality indicators of marine video systems by automated processing of video information: the accuracy of visual data, the bit rate of transmission over communication channels and the computational complexity of algorithms for analyzing and transmitting video information. The proposed study provides algorithms for spectral and spatial processing of video information. The results of algorithm modeling and comparative evaluation of information indicators of intelligent marine video systems are also presented: accuracy, bit rate and computational complexity of marine image processing video systems.

Keywords: intelligent marine video systems, compression and recovery, marine scenes, marine vessels, compression ratio, accuracy and complexity.

Введение

Своевременное обнаружение, распознавание и прогнозирование поведения морских судов очень важны для раннего предупреждения о рискованном поведении, для выявления потенциальных столкновений судов, для повышения эффективности морского движения и т.д., следовательно, являются актуальной темой и неотъемлемой частью при синтезе интеллектуальных морских технологий навигации [1], [2]. При этом важнейшим компонентом совершенствования таких технологий является наличие в составе интеллектуальной морской

видеосистемы подсистем передачи видеоинформации морских сюжетов:

1) на основе спектрального преобразования сигналов из пространственной области в частотную для оперативной доставки видеоинформации, полученной с различных камер подводного и надводного наблюдения;

2) на основе пространственных методов обработки без перехода в спектральную область сигнала для передачи выделенных ключевых точек объектов (КТО) на изображениях [3].

Любая практическая морская видеосистема должна иметь теоретический прототип или образец, к которому должны стремиться её параметры. С

точки зрения теории передачи информации – эта система при которой осуществляется равенство пропускной способности канала связи и энтропии источника видеoinформации [4], [5]. Важно при синтезе систем передачи информации обеспечить данное равновесие, которое доказано в работе [6]. Причем указано также о наличии множественных решений уравнения связи, обеспечивающего равенство скорости формирования источников изображений и битовой скорости передачи по каналу. В известной книге К. Шеннона отмечено, что идеальная система характеризуется стремлением сложности устройства обработки к бесконечности и задержками при кодировании и декодировании видеoinформации [4], [7]. Нетривиальность данного положения при синтезе видеосистем передачи с точки зрения практики привело к тому, что важнейшими параметрами для оптимизации систем передачи видеoinформации, кроме битовой скорости и точности восстановления сжатых визуальных данных, являются сложности устройств кодирования и декодирования изображений. Об этом четко было обозначено в знаменитой работе [8], где показано, что в показатели качества функционирования устройств сжатия необходимо включать не только меру приближения к энтропии источника: «Оптимизацию видеокодека надо делать (минимум) по трём параметрам: по битовой скорости, по искажению и по вычислительной сложности. Все они влияют друг на друга. Например, оптимизация соотношения скорость/искажение достигается за счёт повышения сложности кодирования, "быстрые" алгоритмы оценки движения часто имеют низкую вычислительную сложность за счёт снижения эффективности кодирования и т. д. Эффективность кодирования и сложность кодирования являются настоящими антиподами» [7].

На основе сказанного выше выделяют два вида «эффективности» видеосистем обработки видеoinформации [8], [9]:

- битовая скорость передачи C информации и её приближение к энтропии H источника;
- вычислительная сложность W и количество потребляемых ресурсов.

Битовая скорость передачи связана с понятием качества видеoinформации, а сложность – с оптимальным способом обработки визуальных данных, где понятие эпсилон-энтропии с ограничением сложности становится значимым при определении требуемого ресурса для выполнения нужных вычислений [9], [10]. Оценка обоих указанных показателей при разработке транспортных, в частности морских видеосистем передачи изображений, является предметом рассмотренным в данной статье.

1. Методы передачи морской видеoinформации

Спектральные методы передачи. Тенденция при создании интеллектуальных видеосистем направлена на использование технологии «система на кристалле» [10], [11], где имеется: процессор общего назначения, интегрированный в виде одного чипа с пользовательскими аппаратными ускорителями, блоки памяти и программируемая логика для аппаратной реализации сложных функций. Следовательно, для размещения на одном кристалле аппаратных и программных сложно-

функциональных блоков, необходимы разработки новых параллельных алгоритмов обработки больших объёмов визуальных данных.

В данной статье разрабатываются два принципиально отличающихся друг от друга метода решения данной проблемы:

I) метод обработки изображений на основе спектрального анализа с применением адаптивного дискретного косинусного преобразования (ДКП);

II) метод обработки изображений на основе пространственного подхода с применением пространственно-рекурсивного метода (ПРМ) выделения КТО на изображениях.

На рисунке 1 представлена структура алгоритмов обработки изображений, которая послужила базой для систематизации алгоритмов передачи морских сюжетов по каналам связи и направленная на выявление оптимальных путей решения задачи оперативной и своевременной доставки видеoinформации морской специфики в центры управления и регулирования движения морских судов.

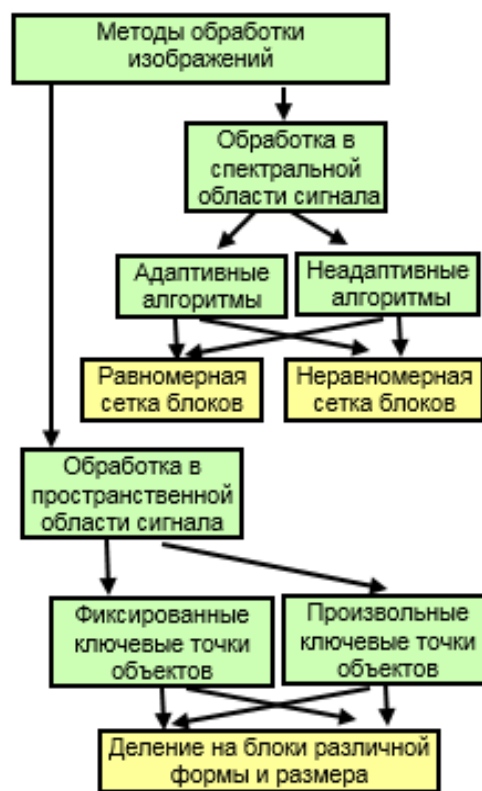


Рис. 1. Структура алгоритмов обработки изображений

Важно отметить, что оперативная доставка высококачественной видеoinформации в первую очередь зависит от алгоритма сжатия и восстановления, позволяющего уменьшить объём информации без существенной потери качества. Таким образом, различные алгоритмы сжатия уменьшают объём информации, что приводит к значительному сокращению битовой скорости передачи двоичных данных, и, следовательно, к уменьшению ширины спектра видеосигнала.

В данной статье предложен адаптивный алгоритм на базе ДКП, позволяющий увеличить степень сжатия с сохранением качества восстановления.

Процесс обработки видеоинформации на основе адаптивного ДКП включает следующие основные этапы (рис. 2):

Этап 1: Выполнение ДКП включает следующие основные процедуры:

- разбиение исходного изображения на блоки в зависимости от степени корреляции яркостей соседних пикселей изображения;

- применение к каждому блоку двумерного ДКП.

Этап 2: Выполнение адаптивного квантования полученных коэффициентов с учетом концентрации и расположения элементов матрицы коэффициентов ДКП $Q[i][j]$. При этом обнуление незначимых коэффициентов осуществляется по следующей формуле:

$$Q[i][j] = 1 + (1+i+j)/QF.$$

Выбор соответствующего коэффициента качества QF для синтеза матрицы квантования осуществляется на основе указанного выше требования равновесия битовой скорости передачи и пропускной способности канала при заданной точности сжатия видеоинформации.

Степень сжатия зависит от характеристик конкретного изображения и требуемого качества восстановления для конкретного приложения. Достижимый коэффициент сжатия оценивается величиной порядка 100:1.

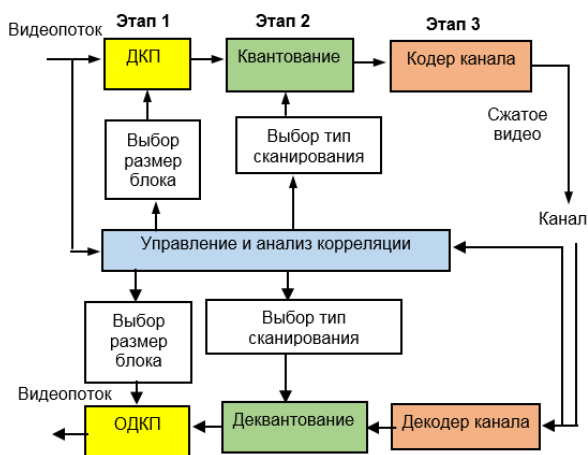


Рис. 2. Структурная схема процесса адаптивного алгоритма на основе ДКП

С точки зрения статистической обработки сигнала ДКП является неплохим приближением оптимального дискретного преобразования Карунена–Лоэва для марковских процессов первого порядка. Преобразование Карунена–Лоэва оптимально в плане уплотнения энергии, т. е. имеет наименьшее среди унитарных преобразований количество коэффициентов. Однако оно зависит от статистики сигнала и поэтому сложно и объёмно в вычислительном смысле. В этом отношении ДКП составляет ему достойную альтернативу с точки зрения битовой скорости и вычислительной сложности алгоритмов.

Формула для реализации двумерного ДКП определяется следующим образом:

а) для прямого ДКП-2D:

$$F(u, v) = \alpha(v, N) \alpha(w, M) =$$

$$\sum_{y=0}^{N-1} \sum_{z=0}^{M-1} f(x, y) \cdot \frac{\cos(2x+1)v\pi}{2N} \cdot \frac{\cos(2y+1)w\pi}{2M},$$

где F – значение коэффициента прямого косинусного преобразования, x, y – координаты пикселя в трехмерном пространстве куба размером $M \times N$, v, w – координаты коэффициента преобразования:

$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \sqrt{1/j}, & \text{при } i = 0 \\ \sqrt{2/j}, & \text{при } i \neq 0 \end{cases},$$

при этом j принимает значение M или N .

б) для обратного ДКП-2D определяется по формуле:

$$f(x, y) =$$

$$\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \alpha(v, N) \alpha(w, M) F(v, w) \cos\left(\frac{(2m+1)v\pi}{2M}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)w\pi}{2N}\right)$$

где $f(x, y)$ – значение яркости пикселя с координатами (x, y) в пределах блока после обратного ДКП.

При выполнении ДКП квадратной матрицы из $L \times L$ элементов изображения получается также квадратная матрица из $L \times L$ коэффициентов ДКП действительных чисел. Операция ДКП не изменяет количества передаваемой информации, а создает основу для последующего значительного уменьшения объема информации после преобразования. Возможность сокращения битовой скорости цифрового потока при помощи ДКП основана на статистических свойствах пространственно-частотного спектра реальных изображений и на ограниченной способности зрительного восприятия.

Объём передаваемой видеоинформации сокращается из-за более грубого квантования полученных коэффициентов ДКП. В результате число двоичных битов, используемых для представления этих коэффициентов, уменьшается, а большинство коэффициентов становятся равными нулю.

Предложенный в работе алгоритм позволяет исследовать уменьшение скорости цифрового потока за счет управления отбрасыванием части информации. Поэтому изображение, получаемое с помощью обратного ДКП в приемной части системы, не будет идентично исходному изображению. Следовательно, данный метод кодирования относится к методам кодирования с частичной потерей информации. Однако отбрасываемая информация оказывается несущественной для зрительного восприятия, а возникающие изменения и искажения не снижают или почти не снижают его субъективно воспринимаемого качества. В работе исследовано несколько алгоритмов и найдены оптимальные параметры кодера R, W и ε при соответствующих значениях качества квантования и размера сегмента ДКП.

Таким образом, использование ДКП в сочетании с последующим квантованием коэффициентов ДКП обеспечивает уменьшение количества передаваемой информации и, следовательно, требуемой ширины полосы частот канала связи.

Пространственные методы передачи. Сейчас стало очевидным, что погоня за созданием

специализированных высокоскоростных алгоритмов для двумерных преобразований не дала качественного скачка в решении задачи анализа и передачи изображений, так как слишком узкий класс изображений адекватен двумерному стационарному полю. По инерции задачу анализа изображений подменили упражнением в быстром вычислении аппроксимирующих коэффициентов ряда Фурье, Адамара, Уолша, Хаара и т.д., забыв, что это прежде всего аппарат аналитических преобразований.

В работах [11], [12], [13] авторами разработан новый подход анализа и передачи изображений на основе ПРМ разбиения исходного изображения на полигоны различной формы и размера с целью выделения КТО на изображениях и тем самым осуществлено формирование и хранение структуры исходного сигнала. Это позволяет достигать более высокого коэффициента сжатия при сохранении семантики изображения по сравнению со спектральными методами. Однако данное преимущество достигнуто за счет увеличения вычислительной сложности устройств обработки изображений.

На практике наиболее часто производится разбиение изображений на треугольники:

- треугольник является простейшим полигоном, вершины которого однозначно задают грань;
- любую область можно гарантировано разбить на треугольники;
- вычислительная сложность алгоритмов разбиения на треугольники существенно меньше, чем при использовании других типов полигонов;
- реализация процедур рендеринга наиболее проста для области, ограниченной треугольником;
- для треугольника легко определить три его ближайших соседа, имеющих с ним общие грани.

Алгоритмы нахождения КТО разделяются на два класса: с фиксированным расположением КТО в пределах кадра и с произвольным расположением КТО (рис. 3). Первые характеризуются простотой и высокой скоростью обработки, а вторые высокой сложностью устройств и точностью восстановления.

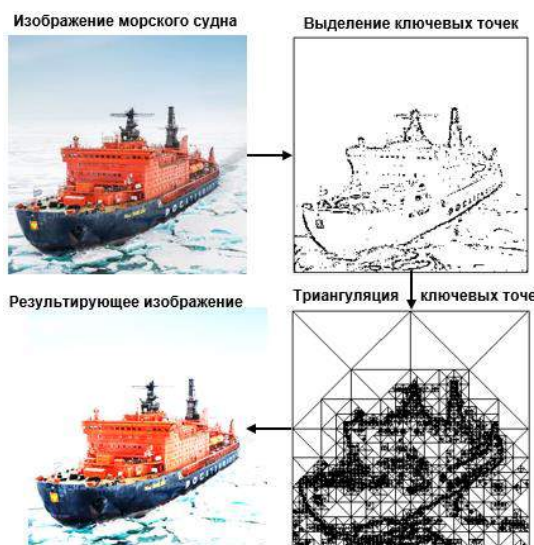


Рис. 3. Процесс сжатия по КТО изображений

Процесс разбиения исходного изображения и преобразование его в набор треугольников называется триангуляцией, а модель кодирования и

декодирования изображений по КТО с применением алгоритма триангуляции (рис. 3) представляет собой, в отличие от спектральных алгоритмов, асимметричный процесс, где сжатие состоит в выделении КТО, а восстановление триангуляция КТО.

Особый интерес к алгоритмам триангуляции определяется тем, что они используются во многих процедурах машинной графики, таких как формирование поверхностей, закраска, удаление невидимых частей, отсечение.

Любая поверхность может быть аппроксимирована с необходимой точностью сеткой треугольников. Точность аппроксимации определяется количеством треугольников (т.е. числом КТО) и способом их выбора. Для качественной визуализации объекта, находящегося вблизи точки наблюдения, требуется учесть во много раз больше треугольников, чем в ситуации, когда тот же объект расположен на удалении. Даже достаточно грубая сетка полезна на практике, так как методы сглаживания, применяемые в процессе отображения, могут значительно улучшить представление о кривизне поверхности.

Суть алгоритмов сжатия по КТО заключается в следующем:

- а) на передающей стороне выполняется:
 - рекурсивное разбиение изображения на равные полигоны в зависимости от степени корреляции яркостей соседних пикселей;
 - формирование неравномерной сетки;
 - нахождение КТО в каждом сегменте полученной сетки;
 - кодирование КТО для передачи по каналам связи.
- б) на приемной стороне выполняется:
 - прием списка КТО
 - триангуляция КТО;
 - закрашивание граней треугольников.

Последним этапом является применение алгоритмов сглаживания, которые устраняют ребристость поверхности и эффект Маха.

При моделировании объекта возникает задача: какое количество треугольников нужно использовать. С одной стороны нужно достичь максимального качества при окончательной визуализации, а с другой – снизить нагрузку на процессор.

Для снижения нагрузки можно использовать менее детализированную триангуляционную сеть, но при этом качество будет далеко не самым лучшим.

При выборе подходов и алгоритмов триангуляции следует руководствоваться целью, которая ставится конкретной задачей. Например, при моделировании объекта, находящегося вдалеке, совершенно нет смысла применять очень детальную сеть для его описания и, наоборот, для близких объектов это очень важно, например, для построения модели морского судна требуется около 10 тыс. треугольников.

Подробное описание алгоритмов нахождения КТО приведены в работах [12], [13], [14].

Сложность пространственных алгоритмов. Поскольку рекурсивный алгоритм представляет собой процесс последовательного вычисления величин, протекающий во времени, следовательно, в каждый момент времени промежуточные величины получают по определенному закону из значений

величин, полученных в предыдущий момент, а трудоемкость самого алгоритма определяется, как общее число элементарных действий, выполняемых при его реализации.

Оценку алгоритма можно проводить сверху или снизу. Оценку сверху выполняют, указав конкретный алгоритм решения задачи, т.к. трудоемкость задачи не превышает трудоемкости любого из решающих её алгоритмов.

Оценку снизу получают из некоторых общих соображений (например, мощностных или информационных).

Сложность алгоритма можно рассматривать по следующим величинам:

1. Время работы алгоритма.
2. Объем памяти, требуемый для работы алгоритма.
3. Размер программы (количество операции).

Рекурсивными процедурами называются процедуры, которые вызывают сами себя. Их сложность определить довольно тяжело. Сложность этих алгоритмов зависит не только от сложности внутренних циклов, но и от количества итераций рекурсии. Рекурсивная процедура может выглядеть достаточно простой, но она может серьезно усложнить программу, многократно вызывая себя. Рекурсивный алгоритм, который вызывает себя несколько раз, называется многократной рекурсией. Такие процедуры гораздо сложнее анализировать, кроме того, они могут сделать алгоритм гораздо сложнее.

2. Оценка эффективности алгоритмов обработки изображений

Обобщенный показатель эффективности кодирования P должен учитывать не только меру приближения к энтропии (эпсилон-энтропии) источника морских изображений, но и то, какими информационными средствами достигнуто данное приближение, в первую очередь – какой сложностью кодера. С этой целью в дополнение к информационным показателям: точности и битовой скорости передачи из-за несоответствия энтропии источника и пропускной способности канала связи, необходимо учитывать сложность и ограниченность вычислительных ресурсов W , отпускаемых на устройство обработки источника нестационарных морских изображений.

Ограничение вычислительной сложности выражают либо в битах на пиксел, при программной реализации в операциях на пиксел. При этом W имеет порядок 1...1000, либо целиком в битах на СБИС, например, для кодера на основе трёхмерного ДКП для фотоприёмников до 4×10^6 пикселов $W \approx 3 \times 10^6$. Тогда показатель эффективности использования сложности примет вид:

$$P = c_0 \Delta(\text{ско}) + c_1 R(\epsilon) + c_2 W_k(\text{ско}) + c_3 W_d(\text{ско}) \rightarrow \min.$$

Показатель эффективности P , включает взвешенную сумму $\{P\}$ частных информационных показателей как 2-ва кодирующих устройств, которые связаны со среднеквадратической ошибкой передачи (СКО):

- степень искажения исходной информации Δ ;
- скорости передачи R ;
- сложности W_d декодера;
- сложности W_k кодера.

Вектор весовых коэффициентов $\{c_i\}$ при этих показателях – есть «вектор концепции системы» [11], [15]. А задача оптимизации при синтезе видеосистем на кристалле в целом сводится к поиску оптимальных значений информационных показателей качества при заданных соответствующих весовых коэффициентах, в то же время, обеспечивающих минимум целевой функции P [10], [16].

3. Результаты моделирования алгоритмов

Одним из наиболее используемых методов количественной оценки качества изображения является СКО. Это показывает, как пиксельно похожи два изображения. Но при этом не учитывается никакой структурной информации о них. В качестве альтернативы были предложены другие методы в области транспортных сюжетов [13].

В работе [13] предложена новая качественная (универсальная) методика оценки качества, основанная на вычислении трех информационных показателей качества видеосистем обработки изображений. На сегодняшний день этот метод оказался универсальным и практичным для проектирования морских интеллектуальных видеосистем анализа и передачи в реальном времени.

Тестирование спектральных алгоритмов (ДКП), дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и пространственного (ПРМ) было выполнено с использованием объектно-ориентированного языка C++ среды Visual Studio и с использованием библиотеки OpenCV. Сравнение эффективности выше перечисленных алгоритмов осуществляется на основе следующих количественных оценок: СКО, W , R и СИГ/ШУМ.

1) Отношение максимальной мощности сигнала к мощности искаженного шума, влияющего на качество, является пиковым отношением сигнал/шум.

$$\text{СИГ/ШУМ} = 20 \log_{10} \left(\frac{255^2 (3)}{\text{ско}} \right) - \text{значение}$$

информационного показателя сигнал/шум,

2) СКО определяется по формуле:

$$\text{ско} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| f(i, j) - g(i, j) \|^2}{m \cdot n}.$$

3) Вычислительная сложность алгоритмов (W) была оценена, как число операций на один пиксел исходного изображения формата 256×256 .

4) Битовая скорость передачи сжатых видеоданных вычислена путём определения числа бит/пиксель. Данный показатель характеризует коэффициент сжатия видеoinформации.

В работе, для приведения результатов выбрано три представительных класса морских сюжетов (рис. 4). В таблице приведено сравнение результатов сжатия различными методами.

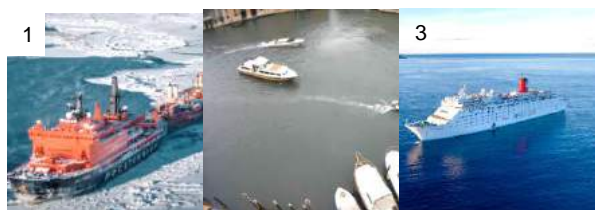


Рис. 4. Тестовые изображения 1–3

Таблица результатов тестирования алгоритмов обработки видеoinформации

№ изображения	Критерии оценки	СИГ/ШУМ	$K_{сж.}$	ско	W	R
1	ДКП	39,8	20	7,5	46	0,4
	ДВП	37,1	40	14	54	0,2
	ПРМ	40,3	42	13	63	0,19
2	ДКП	36,3	26	17,1	56	0,3
	ДВП	34,5	47	19,2	65	0,17
	ПРМ	38,8	53	15,9	75	0,15
3	ДКП	33,9	16	17,7	55	0,5
	ДВП	32,4	44	17,6	71	0,18
	ПРМ	39,4	57	13,6	83	0,14

- класс изображений № 1 с малой широкополосностью и малой мерой неопределенности;

- класс изображений № 2 со средней широкополосностью и средней мерой неопределенности;

- класс изображений № 3 с большой широкополосностью и большой мерой неопределенности.

Остальные сюжеты дали приблизительно такие же результаты. Поскольку было исследовано большое количество изображений для каждого класса, то результаты были усреднены, а погрешность не превысила 2%.

Проведенные в ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской

академии наук эксперименты по сжатию морских изображений на основе спектральных (ДКП и ДВП) и пространственных (ПРМ), показали:

1) для всех классов изображений (№ 1–3) значение СИГ/ШУМ (в таблице указан жирным шрифтом) пространственного метода выше, чем спектральных, на основе косинусного и вейвлет-преобразований;

2) для класса изображений № 2 значение коэффициента сжатия пространственного метода выше, чем спектральных, на основе косинусного и вейвлет-преобразований;

3) для класса изображений № 3 значение вычислительной сложности алгоритмов реализации спектрального косинусного преобразования ниже, чем у пространственных и вейвлет-преобразований.

В таблице все выше указанные преимущественные показатели указаны жирным шрифтом.

Заключение

Можно обозначить два вывода, на основе проведенных исследований:

1. Проведенные исследования по оценке качества видеoinформации в видеосистемах обработки морских сюжетов при применении эффективности расхода вычислительных ресурсов показали, что для синтеза высокопроизводительных интеллектуальных морских технологий обработки видеoinформации, необходимо осуществлять параметрический синтез и количественно сравнивать спектральные и пространственные методы при формализации обобщённого показателя эффективности, включающего коэффициент сжатия, ошибку сжатия и вычислительную сложность системы.

2. Дискретное косинусное преобразование, несколько уступая пространственному и вейвлет-преобразованиям по степени приближения к энтропии источника морских изображений, заметно превосходит их по эффективности использования вычислительных ресурсов.

Литература

1. R. Schettin and S. Corchs, "Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods," EURASIP J. Adv. Signal Process., vol. 2010, Dec. 2010, Art.no.746052.
2. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Поточковая обработка видеoinформации морских сюжетов с использованием расширенной инструкции процессора // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2 (51), Т. 2. С. 124-131.
3. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов // М.С. Крюкова, Я.А. Хасан, Ш.С. Фахми и др. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1-3 (43). С.145–155.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – 832 с.
5. Цыцулин А.К., Зубакин И.А. Множественность решений уравнения связи // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2013. Вып. 2. С. 47–59.
6. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – М.: Техносфера, 2005. – 368 с.
7. Фахми Ш. С., Ибатуллин С. М. и др. Измерение качества видеoinформации на выходе цифрового кодера источника и его эффективности // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения. 2016. Вып. 4. С. 33–40.
8. Твёрдотельные телекамеры: накопление качества информации / А.К. Цыцулин, Д.Ю. Адамов, А.А. Манцетов и др. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 272 с.
9. Tan, X., Liu, Y., Zuo, C., & Zhang, M. (2017). A real-time video denoising algorithm with FPGA implementation for Poisson–Gaussian noise. Journal of Real-Time Image Processing, 13(2), 327–343.
10. Фахми, Ш.С. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам / Ш.С. Фахми, Е.В. Костикова, М.С. Крюкова, С.А. Селиверстов / Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С.143–156.

11. Фахми Ш.С., Железнов М.М., Турусов С.Н. Метод и алгоритмы триангуляционного кодирования и декодирования изображений морских сюжетов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 (36). Т.2. С. 91–100.
12. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В., Колесниченко С.В. Многопроцессорная система обнаружения и слежения за морскими судами на базе технологии "система на кристалле" // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 3 (53). С. 179–185.
13. Иванов А.В., Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы и устройства кодирования и декодирования изображений: Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация ВУЗ, 2019. – 260 с.
14. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Крюкова М.С. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 129–136.
15. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Транспортные видеосистемы на кристалле: методы и технологии проектирования. Монография. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 346 с.
16. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Вислогузов В.В., Костикова Е.В. Многопроцессорная транспортная видеосистема наблюдения на базе технологии "система на кристалле" // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 172–179.

References

1. R. Schettin and S. Corchs, "Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods" [Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods] EURASIP J. Adv. Signal Process., vol. 2010, Dec. 2010, Art.no.746052.
2. Fakhmi Sh.S., Shatalova N.V., Kostikova E.V. Potokovaya obrabotka videoinformacii morskikh syuzhetov s ispol'zovaniem rasshirennoj instrukcii processora [Streaming video processing of marine scenes using advanced processor instructions] // Marine Intelligent Technologies. 2021. N. 2 (51), T. 2. S. 124–131.
3. Fahmi Sh.S. Metody, algoritmy kodirovaniya i klassifikaciya izobrazhenij morskikh sudov [Methods, coding algorithms and classification of images of sea vessels] / M.S. Kryukova, Hasan Ya.A., Sh.S. Fahmi et al. // Marine intelligent technologies. No. 1 (43). Vol.3. 2019. P.145–155.
4. Shannon K. Raboty po teorii informacii i kibernetike [Works on information theory and cybernetics]. – M.: ILL. 1963, – 832 p.
5. Tsitsulin A.K., Zubakin I.A. Mnozhestvennost' reshenij uravneniya svyazi [Multiplicity of solutions of the coupling equation] // Vopr. radio electronics. Ser. Television technology. 2013. Issue. 2. Pp. 47–59.
6. Richardson Ya. Video encoding. N.264 i MPEG-4 – standarty novogo pokoleniya [H.264 and MPEG-4 - generationis signa]. – M.: Technosphere. 2005. 368 p.
7. Fahmi S.S., Ibatullin S.M. et al. Izmerenie kachestva videoinformacii na vyhode cifrovogo kodera istochnika i ego effektivnosti [Measuring the quality of video information at the output of the source digital encoder and its efficiency] // Radio electronics issues, ser. Television Technology, 2016, issue 4, pp. 33–40.
8. Tvyordotel'nye telekamery: nakoplenie kachestva informacii [Solid-state television cameras: information quality accumulation] / A.K. Tsitsulin, D.Y. Adamov, A. A. Mantsvetov, etc. – St. Petersburg: Publishing House of SPbSETU "LETI", 2014. 272 s.
9. Tan X., Liu Y., Zuo C. & Zhang M. (2017). A real-time video denoising algorithm with FPGA implementation for Poisson–Gaussian noise. Journal of Real-Time Image Processing [A real-time video denoising algorithm with FPGA implementation for Poisson–Gaussian noise. Journal of Real-Time Image Processing], 13(2), 327–343.
10. Fahmi S.S. Videosistema obnaruzheniya morskikh sudov po triangulyacionnym reshnyotkam [Sea Vessel Detection Video System for Triangulation Grilles] / S.S. Fahmi, E.V. Kostikova, M.S. Kryukova, S.A.Seliverstov / Marine intelligent technologies. No. 3 (41). Vol.1. 2018. S.143–156.
11. Fahmi S.S., Zheleznov M.M., Turusov S.N. Metod i algoritmy triangulyacionnogo kodirovaniya i dekodirovaniya izobrazhenij morskikh syuzhetov [Method and algorithms of triangulation coding and decoding of marine plots images] // Marine intelligent technologies. 2019. No. 4 (36). Vol.2. S.91–100.
12. Fakhmi Sh.S., Shatalova N.V., Kostikova E.V., Kolesnichenko S.V. Multi processor systematis technologiae cognoscendi et semitae marinae subnixus "systema-on-chip" technologiae marinae intelligentis [Multiprocessor system for detecting and tracking marine vessels based on the "system on chip" technology]. 2021. T. 1. N. 3 (53). S. 179-185.
13. Ivanov A.V., Fahmi S.S. Metody, algoritmy i ustrojstva kodirovaniya i dekodirovaniya izobrazhenij [Methods, algorithms and devices for encoding and decoding images]: Monograph. – St. Petersburg: Publishing and Printing Association of the University, 2019. – 260 s.
14. Fahmi SH.S., Shatalova N.V., Kryukova M.S. Vydelenie konturov morskikh ob"ektov na osnove piramidal'no-rekursivnogo metoda predstavleniya izobrazhenij [Highlighting outlines of marine objects based on a pyramidal recursive image representation method] // Morskie i-ntellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-2 (44). P. 129–136.
15. Fahmi Sh.S., Kostikova E.V., Shatalova N.V. Transportnye videosistemy na kristalle: metody i tekhnologii proektirovaniya [On-Chip Transport Video Systems: Design Methods and Technologies]: Monograph. – St. Petersburg: Publishing and printing Association VUZ, 2020. S. 346.
16. Fahmi Sh.S., Shatalova N.V., Visloguzov V.V. Kostikova E.V. Mnogoprocessornaya transportnaya videosistema nablyudeniya na baze tekhnologii "sistema na kristalle" [Multiprocessor transport surveillance video system based on "system on chip" technology] // Marine intellectual technologies. 2020. No. 3-1 (49). S. 172-180.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53.

Ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: shatillen@mail.ru

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Надежда Юрьевна Пышкина, старший преподаватель кафедры Математического моделирования и прикладной информатики Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д.5/7, e-mail: pyshkinanady@yandex.ru

Юрий Иванович Васильев, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Портов и грузовых терминалов, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: yuvas@gmail.com

Shakeeb S. Fahmi, Associate Professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation.

Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Phd, Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Elena V. Kostikova, Phd, Associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Nadezhda Y. Pyshkina, senior Lecturer of the department of Mathematical Modeling and Applied Computer Science, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St.Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: e-mail: pyshkinanady@yandex.ru

Yuri I. Vasilev, Associate professor, Ph.D.(Eng.), professor of the Department of Ports and cargo terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and inland Shipping, Dvinskaya st., 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: yuvas890@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.10.2021

Принята к публикации: 26.11.2021

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.246.87

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.045>**Анализ шума в модельном эксперименте по измерению ледовых нагрузок с использованием пробега по чистой воде**А.М. Резцова¹, e-mail: angelina-rezcova@mail.ru, П.Н. Звягин¹, e-mail: icelab@spbstu.ru,¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Модельный эксперимент в ледовом бассейне позволяет выяснить ледовые качества проектируемого ледостойкого морского сооружения, в том числе – получить представление о возможных ледовых нагрузках путем измерений глобальных нагрузок многокомпонентным динамометром. Чувствительность применяемого оборудования приводит к появлению шумовых помех в измеренном сигнале, вызванных действиями людей, обслуживающих эксперимент, работой машин и механизмов, гидродинамическими эффектами, а также явлениями в электросети. Отделение шумовых помех от полезного сигнала на этапе обработки данных является важной задачей, успешное решение которой позволит повысить достоверность результатов испытаний в ледовом бассейне. В настоящей работе изложен подход к очистке от шума результатов измерений многокомпонентного динамометра, применяемого в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра (Санкт-Петербург), с использованием амплитудно-частотного анализа участков пробега модели по чистой воде в пределах технологического окна во льду. Предложенный метод показал свою эффективность, в особенности – для экспериментов с моделью больших размеров.

Ключевые слова: ледовые нагрузки, шум, ледовый бассейн, динамометр

Noise analysis in a model experiment for measuring ice loads using ice free water runAngelina M. Reztsova¹, e-mail: angelina-rezcova@mail.ru, Petr N. Zvyagin¹, e-mail: icelab@spbstu.ru,¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. A model experiment in an ice tank allows to examine ice qualities of a designed ice-resistant marine structure, namely possible ice loads by measuring global loads with a multicomponent dynamometer. The sensitivity of the equipment leads to the noise interference in the measured signal caused by people's actions carrying out the experiment, by the operation of machines and mechanisms, hydrodynamic effects, as well as the phenomena in the electrical power grid. It is important to separate noise interference from the relevant signal at the data processing stage, which will increase the reliability of ice tank experiments. This paper describes a method for denoising measurement results of a multicomponent dynamometer used in the ice tank of the Krylov State Scientific Center (St. Petersburg); the approach implies an amplitude-frequency analysis of model run areas in ice-free water within the technological window in the ice. The proposed method has demonstrated its effectiveness, especially for experiments with large models.

Keywords: ice loads, noise analysis, ice tank, dynamometer

Введение

Ледовые условия в зимне-весенний период характерны для всех морей Российской Федерации, находящихся в умеренных и арктических широтах. Стационарные сооружения, предназначенные для эксплуатации в таких условиях, должны обладать своими ледостойкости, достаточными для сопротивления максимальной ледовой нагрузке [1]. Проектирование ледостойких сооружений часто сопровождается испытаниями их физических моделей в ледовом бассейне [2]. В ходе таких экспериментов осуществляется измерение нагрузок, оказываемых моделированным льдом на физическую модель сооружения. Как правило, эксперимент в ледовом бассейне включает в себя измерение компонент глобальной ледовой нагрузки. Нужно отметить, что оценка такого типа нагрузок в натуральных условиях исключительно затруднена [3], и более простой задачей является измерение локальных нагрузок [4].

Процедура измерения ледовых нагрузок, как в натуральных, так и в модельных условиях сопровождается влиянием посторонних явлений, таких как работа машин, механизмов, передвижение людей поблизости от измерительной аппаратуры. В

модельных экспериментах к перечисленным явлениям могут добавляться гидродинамические. Возникает вопрос: насколько сильно такие влияния окружающей среды искажают зарегистрированные ряды временных нагрузок? Особенно важным этот вопрос является по отношению к задаче выяснения стационарности процессов ледовых нагрузок.

Ранее, наиболее результативным типом модельного эксперимента в ледовом бассейне с точки зрения стационарности получающихся ледовых нагрузок был эксперимент с цилиндрическими инденторами [5], [6]. При этом стационарность была установлена для нагрузок, возникающих при сравнительно высоких скоростях. Например, в работе [6] диапазон скоростей, при которых были установлены закон распределения и факт стационарности процессов ледовых нагрузок, составил 0.084-0.1 м/с.

В Санкт-Петербурге действуют два ледовых бассейна: ледовый бассейн в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ), и в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ). В настоящей работе мы будем опираться на измерения, сделанные в новом ледовом бассейне КГНЦ [7]. В этом ледовом бассейне для

экспериментов, как правило, используется гранулированный лед

Модельные эксперименты в ледовом бассейне КГНЦ проводятся по принципу обращенного движения, когда ледовое поле остается неподвижным, а движется буксировочная тележка с прикрепленной к ней моделью. В месте крепления модели к буксировочной тележке располагается многокомпонентный динамометр, который, в совокупности с тензометрическим усилителем, аналого-цифровым преобразователем и программным обеспечением (Рис. 1) составляет комплекс измерения глобальных нагрузок. Обозначенные на рисунке каналы предназначены для измерения продольной (F_x), поперечной (F_y), и вертикальной (F_z) сил, а также моментов крена (M_x), дифферента (M_y) и рыскания (M_z). При проведении испытаний моделей судов и морских инженерных сооружений осуществляется запись временных рядов для этих каналов с определенной частотой дискретизации, чаще – 100 или 200 наблюдений в секунду.

В настоящей работе будет осуществлен анализ шума продольной компоненты ледовой нагрузки, измеренной в модельных экспериментах с цилиндрическими инденторами (рис. 2 а) и с моделью сооружения, имеющей наклонную плоскость (рис. 2 б). В этих экспериментах данные канала F_x были получены с шагом дискретизации $\Delta t = 0.005$ с, что соответствует частоте опроса 200 Hz. Инденторные тесты, которые также используются для определения прочности ледового поля на сжатие, просты в исполнении, а сами инденторы могут рассматриваться в качестве моделей тонких колонн или цилиндрических опор морских сооружений.

Как правило, в ходе эксперимента модель устанавливается в технологическом окне свободной воды (Рисунок 2), затем осуществляется его буксировка через ледовое поле с частичным преодолением участка свободной воды. При этом, во многих записях, выполненных в модельных испытаниях, обнаруживаются шумы и помехи различной природы. Если присутствие таких помех на участках записи, соответствующих пробегу по свободной воде, обнаружить несложно, то отделение помех от полезного сигнала на участках преодоления ледового поля является сложной задачей. Далее в настоящей работе для этих целей применена фильтрация сигнала, выполненная на основе анализа участков пробега по чистой воде.

Определение шумовых компонент временного ряда продольной компоненты нагрузки в модельных испытаниях

Инденторные тесты проводятся при различных скоростях. В настоящей работе рассмотрены измерения, выполненные при скоростях 1, 3, 5, 10 и 25 мм/с. Для индентора $\varnothing 30$ мм были проведены контрольные измерения канала F_x в состоянии покоя и при движении по чистой воде. Показания канала не были постоянными, соответствующие статистики разброса приведены в Таблице 1.

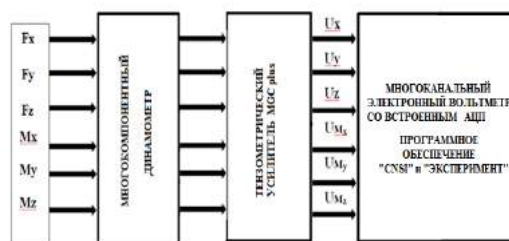


Рис. 1. Структурная схема устройства измерения глобальной нагрузки в экспериментах



а)



б)



в)

Рис. 2. Эксперименты в ледовом бассейне: а) с цилиндрическим индентором $\varnothing 30$ мм; б) с наклонной гранью модели шириной 700 мм; в) с вертикальной гранью модели шириной 700 мм;

Состояние индентора в воде	Размах	Интерквартильный размах	С.к.о.
В покое	0.279	0.031	0.035
Движение, 1 мм/с	0.279	0.031	0.036
Движение, 3 мм/с	0.279	0.062	0.038
Движение, 5 мм/с	0.311	0.062	0.044
Движение, 10 мм/с	0.404	0.062	0.050

Таблица 1. Статистики разброса в калибровочном инденторном тесте без ледовой нагрузки.

Для дальнейшего анализа были рассмотрены временные ряды измерений канала Fx, полученных в пробегах индентора через моделированный лед с началом в технологическом окне. Эти эксперименты были выполнены для стохастического анализа нагрузок на цилиндр при разрушении льда смятием [8]. При этом на участках пробега через технологическое окно чистой воды были обнаружены явления, которые предположительно можно отнести к шумовым эффектам (рисунок 3). При этом регулярные колебательные явления отсутствуют, что можно объяснить малыми размерами инденторов и незначительным объемом их погруженной части. Вывод о наличии всплеска можно сделать на основе способа детектирования выбросов при помощи межквартильного расстояния [9]. Тогда диапазон допустимых значений измерений канала Fx при пробеге по чистой воде характеризуется следующим отрезком:

$$[x_{0.25} - \frac{3}{2}(x_{0.75} - x_{0.25}); x_{0.75} + \frac{3}{2}(x_{0.75} - x_{0.25})], \quad (1)$$

где $x_{0.25}$ - нижний квартиль, $x_{0.75}$ - верхний квартиль, определяются как значения случайной величины ξ , такие что $P(\xi < x_\alpha) = \alpha$.

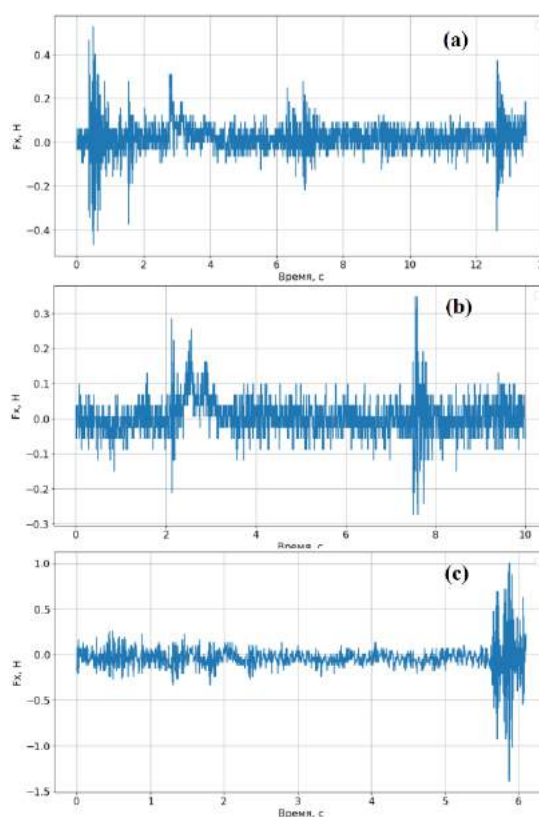


Рис. 3. Зашумленные участки временных рядов продольной силы Fx, соответствующие пробегу индентора по технологическому окну с чистой водой, для разных скоростей движения индентора: а) скорость 1 мм/с; б) скорость 5 мм/с; в) скорость 25 мм/с.

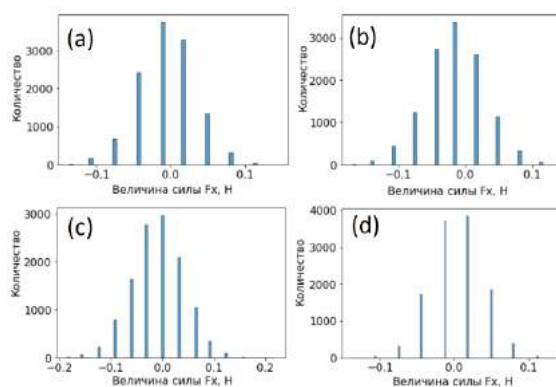


Рис. 4. Гистограммы для данных без всплеска при скоростях: (а) 1 мм/с, (б) 3 мм/с, (с) 5 мм/с, (д) 10 мм/с.

Отметим, что для участков пробега по чистой воде без шумовых эффектов закон распределения показаний канала Fx можно считать нормальным согласно гистограммам, представленным на рисунке 4.

Для модели с наклонной и вертикальной гранями, представленной на Рисунке 2 б) и с) были исследованы пробеги по технологическому окну с чистой водой для выявления колебательных компонент, которые могут быть предметом исключения в последующих данных ледовых нагрузок. При этом скорость составляла 25 мм/с.

Примеры полученных измерений канала Fx (продольная сила) приведены на Рисунке 6 б и с, синим цветом. Основные частоты в этих измерениях, определенные на основе спектральных плотностей, приведены на Рисунке 5. Среди множества обнаруженных частот выделяются частоты в диапазоне 0,9-3 Гц, 9-12 Гц и 50 Гц. К источникам для первых двух диапазонов частот можно отнести механические колебания, в то время как появляющаяся частота 50 Гц совпадает с частотой переменного тока в электросети.

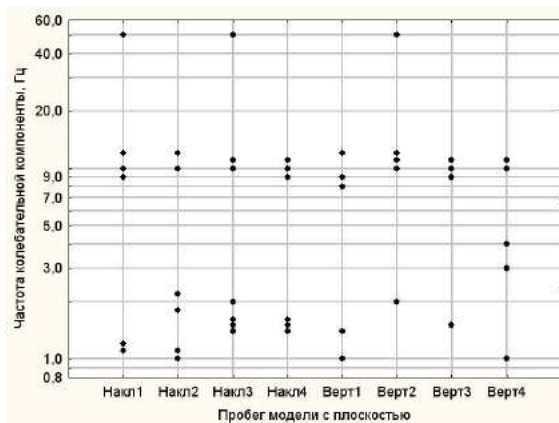


Рис. 5. Основные частоты шумовых явлений в записях нагрузок на модель с наклонной и вертикальной гранями (рисунок 2 б-с), определенные на основе анализа пробега по чистой воде

Фильтрация временного ряда ледовых нагрузок

Будем исходить из предположения, что искажения записей динамометра под влиянием посторонних факторов (удары, шаги человека, вибрация оборудования, гидродинамические явления, электрические помехи) вызывают колебательные явления в показаниях канала Fx. Разложим измеренную величину на две составляющие: $x_i = u_i + w_i$, где x_i – i -тое измерение временного ряда показаний канала Fx, u_i – значимая компонента, w_i – шумовая компонента, время $t = i\Delta t$. Шаг дискретизации Δt зависит от выбранной для данного эксперимента частоты дискретизации сигнала.

Рассмотрим временной ряд как дискретный вещественный сигнал, тогда к нему применимо дискретное преобразование Фурье [10], осуществляемое по следующей формуле:

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (2)$$

По теореме Котельникова – Шеннона [10] для дискретного сигнала, записанного с частотой дискретизации f , существует частота Найквиста $f_N = f/2$, которая является верхней границей полосы частот. Таким образом, границы изменения частоты $f = [0, f_N]$, вне этого отрезка спектр периодически повторяется. Переход от амплитудно-частотной картины к временному ряду реализуется при помощи обратного дискретного преобразования Фурье:

$$y_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (3)$$

Формулы (2) - (3) позволяют разложить сигнал на компоненты, определяемые своими амплитудой и частотой. Спектрограмма нормально распределенного стационарного процесса, задаваемого в каждый момент времени значением не зависящей от времени случайной величины, будет содержать в себе все частоты с одинаковой мощностью. Практически такие же спектрограммы были получены для незашумленных калибровочных пробегов цилиндрического индентора по чистой воде. Напротив, при пробеге по чистой воде модели шириной 700 мм в сигнале канала Fx преобладали частоты, показанные на Рисунке 5, что привело к наличию пика амплитуды на графиках соответствующих спектральных плотностей. Ниже представлен использованный нами алгоритм, реализующий устранение обнаруженной колебательной шумовой компоненты временного ряда:

- к временному ряду ледовой нагрузки применяется ДПФ по формуле (2), в результате получается массив $\{Y(k)\}$ для частот $k \in [0, f_N]$;
- для каждого элемента $\{Y(k)\}$ находится амплитуда $\frac{|Y(k)|}{N}$, N – длина временного ряда;
- по графику определяется частота шумового явления в измеренных данных, выбирается диапазон вырезания λ ;
- значения амплитуд для диапазона частот λ полагаются равными нулю, или заменяются аналогичными участками из спектрограммы модельных данных без всплеска;
- получившийся массив $\{Y'(k)\}$ по формуле (3) преобразуется во временной ряд, который уже не содержит шумовой компоненты.

Практическая реализация алгоритма дискретного преобразования Фурье имеет сложность $O[N^2]$, а быстрое преобразование Фурье (БПФ) в асимптотике имеет сложность $O[N \log N]$, поэтому для вычислений был использован именно этот алгоритм [11].

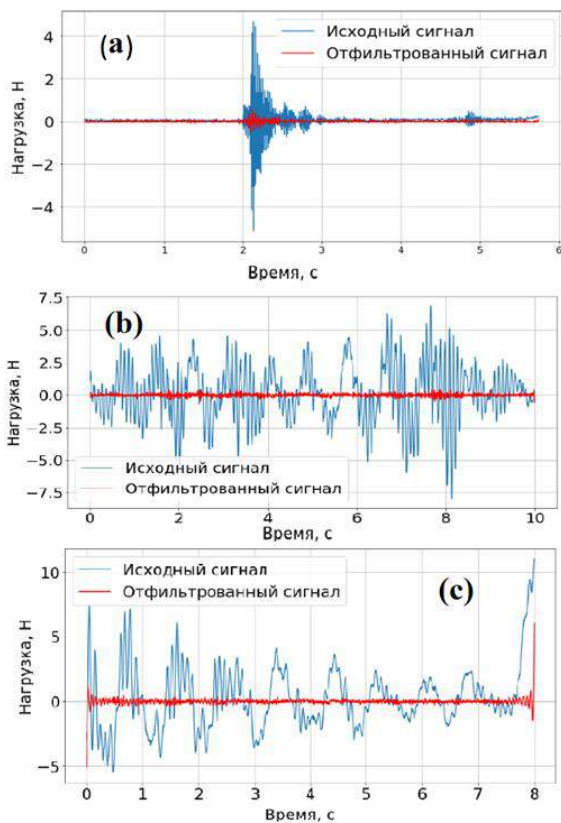


Рис. 6. Графики фрагментов исходных и отфильтрованных показаний канала Fx при пробеге по чистой воде: (а) индентора \varnothing 30 мм, (b) фрагмент модели шириной 700 мм наклонной плоскостью вперед; (с) этой же модели вертикальной плоскостью вперед.

Фильтрация измерений продольной компоненты нагрузки при пробеге индентора и модели по чистой воде позволяет существенно сократить размах измеренных данных за счет удаления влияния посторонних факторов. Примеры графиков исходных показаний канала Fx (синим цветом) и этих временных рядов после фильтрации (красным цветом) приведены на Рисунке 6.

Информацию о характерных частотах для измеренной нагрузки Fx на чистой воде, можно использовать для исключения шумовых эффектов в измерениях этой характеристики при преодолении сплошного моделированного льда. В рассматриваемом эксперименте был использован моделированный лед, приготовленный по технологии Fine Grain в ледовом бассейне КГНЦ. В эксперименте с моделью шириной 700 мм ледовое поле обладало следующими характеристиками (приведены средние значения): прочность на изгиб 20,65 кПа, прочность на сжатие 32,7 кПа, модуль Юнга 33,95 МПа, толщина 50-53 мм. Аналогичными характеристиками обладало ледовое поле, по которому осуществлялся пробег цилиндрического индентора.

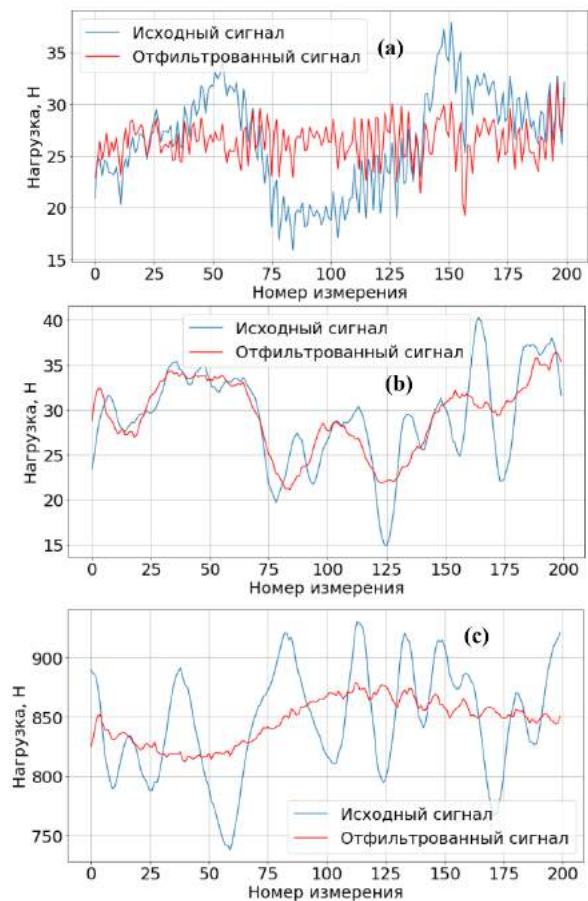


Рис. 7. Графики фрагментов исходных и отфильтрованных продольных нагрузок моделированного льда при пробеге: (а) индентора \varnothing 30 мм, (b) фрагмент модели шириной 700 мм наклонной плоскостью вперед; (с) этой же модели вертикальной плоскостью вперед.

Временные ряды измерений канала Fx для пробега рассмотренных моделей через моделированный лед были разбиты на участки по 200 измерений (длительностью 1 сек). Для этих участков были построены и изучены спектрограммы на предмет наличия частот, обнаруженных в пробегах по чистой воде. Примеры эффективного подавления таких колебательных компонент приведены на Рисунке 7.

Обобщая анализ временных рядов значений канала Fx, можно сказать, что для фрагментов ледовой нагрузки продолжительностью 1 сек фильтрация, в среднем, позволила объяснить 41% разброса значений измеряемой величины для модели с вертикальной стенкой, 43% для модели с наклонной стенкой и 32% для инденторных тестов. Это свидетельствует о возможности существенного влияния посторонних факторов на получаемые результаты измерения ледовой нагрузки при модельных испытаниях в ледовом бассейне. В частности, для модели шириной 700 мм, имитирующей основание морского сооружения, возникающие усилия приводят к ее раскачиванию, что отражается на показаниях канала динамометра, измеряющего продольную нагрузку.

Выводы

Измерения нагрузок, получаемые в ходе модельных испытаний в ледовом бассейне, содержат компоненты, определяемые не относящимися к измеряемому явлению факторами – шумы от работы людей, оборудования, гидродинамических эффектов. Отделение этих компонент от собственно процесса ледовых нагрузок представляет значительную сложность, в частности – вследствие существенной коррелированности данных в пределах временного интервала существования шумового эффекта.

Калибровка динамометра на пробегах по чистой воде позволила установить характеристики эпизодов, которые можно считать искажениями полезного сигнала. Найденные характеристики искажений были использованы для фильтрации всего временного ряда ледовых нагрузок,

полученного как показания канала продольной силы динамометра. Фильтрация была осуществлена при помощи быстрого преобразования Фурье и обратного преобразования Фурье.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что посторонние факторы способны вносить существенные искажения в измеряемые временные ряды ледовой нагрузки. Для инденторов, имеющих малую массу и площадь контакта со льдом и водой шумовые явления присутствовали в виде одиночных импульсных шумов, поддающихся локализации. Для модели с большой массой и площадью шумовая компонента выражалась в низкочастотных колебаниях, демонстрирующих на некоторых участках стационарный характер. Из калибровочных пробегов по чистой воде можно получить значения частот шума, которые впоследствии проявляются и в самих измерениях ледовых нагрузок.

Благодарности

Работа выполнена как часть проекта 0784—2020—0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Литература

1. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
2. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Модельный эксперимент по определению ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019— №2(388). — С. 24–40.
3. Воздействие льда на морские и береговые сооружения: учебное пособие / С. Лосет [и др.]. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 271 с.
4. Тимофеев О.Я. Прогнозирование показателей надежности конструкций ледового пояса. Автореферат диссертации на соискание уч. ст. д.т.н., Санкт-Петербург, 2002.
5. Dobrodeev A. A., Zvyagin P. N., Sazonov K. E. Study on distribution law and stationarity of global ice loads registered in experiments in ice tank // In Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, American Society of Mechanical Engineers, ASME 2016.
6. Zvyagin P. N., Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Ice loads dynamics for model scale cylinders of various diameters // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2017.
7. Timofeev O. Y., Sazonov K. E., Dobrodeev A. A. New ice basin of the Krylov State Research Centre // In Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2015.
8. Zvyagin P. (2021) Autoregressive Model for Ice Loads Registered in Slow-speed Indentation Tests // In Proceedings of the 31st International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE 2021.
9. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: пер. с англ. М.: Мир, 2009. 272 с.
10. Дискретное преобразование Фурье. Учебное пособие /В. П. Кандидов [и др.] Москва: физический факультет МГУ, 2019. 88 с.
11. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989. 448 с.

References

1. SP 38.13330.2012 Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov) [Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships)].
2. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Model'nyy eksperiment po opredeleniyu ledovoy nagruzki na morskije inzhenernyye sooruzheniya [Model test to determinate ice loads on marine engineering structures]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2019, №2(388), s. 24–40.
3. Vozdeystvie l'da na morskije i beregovye sooruzheniya: uchebnoe posobie [The impact of ice on marine and coastal structures]. S. Loset [i dr.], Sankt-Peterburg: Lan', 2010, 271 s.
4. Timofeev O.Ya. Prognozirovaniye pokazateley nadezhnosti konstruksiy ledovogo poyasa [Forecasting of reliability indicators of ice belt structures]. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uch. st. d.t.n., Sankt-Peterburg, 2002.
5. Dobrodeev A. A., Zvyagin P. N., Sazonov K. E. Study on distribution law and stationarity of global ice loads registered in experiments in ice tank. In Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, American Society of Mechanical Engineers, ASME, June 19-24, Busan, South Korea, Vol. 8. 5 p.
6. Zvyagin P. N., Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Ice loads dynamics for model scale cylinders of various diameters // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2017.

7. Timofeev O. Y., Sazonov K. E., Dobrodeev A. A. New ice basin of the Krylov State Research Centre. In Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, June 14-18, Trondheim, Norway.
8. Zvyagin P. N. Autoregressive Model for Ice Loads Registered in Slow-speed Indentation Tests // In Proceedings of the 31st International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE 2021.
9. Teylor Dzh. Vvedenie v teoriyu oshibok [Introduction to Error theory. M.: Mir, 2009, 272 s.
10. Diskretnoe preobrazovanie Fur'e. Uchebnoe posobie [Fast Fourier transform]. V. P. Kandidov [i dr.] M.: fizicheskiy fakul'tet MGU, 2019. 88 s.
11. Bleykhut R. Bystrye algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov [Fast digital signal processing algorithms]. M.: Mir, 1989, 448 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ангелина Максимовна Резцова, инженер Лаборатории фундаментальных основ ледотехнических исследований, студент 4-го курса высшей школы теоретической механики, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: angelina-rezcova@mail.ru

Angelina M. Reztsova engineer of Laboratory of ice engineering research fundamentals, 4th grade student of the Higher school of Theoretical mechanics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, e-mail: angelina-rezcova@mail.ru

Петр Николаевич Звягин, к.т.н., доцент, заведующий Лабораторией фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, e-mail: icelab@spbstu.ru

Petr N. Zvyagin Ph.D. (Eng), Head of Laboratory of ice engineering research fundamentals at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, e-mail: icelab@spbstu.ru

Поступила в редакцию: 10.09 2021

Принята к публикации: 24.10.2021

Применение технологий машинного обучения для Drone Network в логистике и портовой деятельности России

О.М. Михов¹, e-mail: mikhas95@gmail.ru, Н.В. Шаталова¹, e-mail: shatillen@mail.ru,

О.В. Бородина¹, e-mail: borodinaov@gmail.ru, Ю.И. Васильев², e-mail: yuvas890@gmail.com

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Статья посвящена проведению исследовательского анализа особенностей практического использования беспилотных дронов и квадрокоптеров. Актуальность исследования обусловлена тем, что технологии Drone Network позволяют решить основную проблему логистики – провести оптимизацию финансовых расходов, путем сокращения затрат на реализацию цепочек поставок. Это помощь интеграции логистики, дронов и технологии машинного обучения. В рамках статьи рассмотрены теоретические аспекты понятия технологии «Drone Network». Проанализирован зарубежный опыт и международные тенденции в использовании беспилотных дронов при формировании цепочки поставок логистики морских предприятий. Рассмотрены ключевые преимущества, которые предоставляют данные технологии в совершенствовании транспортной логистики компаний. Проанализированы перспективы развития технологий Drone Network на территории Российской Федерации. Рассмотрены основные проблемы, препятствующие их практическому применению российскими компаниями. Проанализированы недостатки, с которыми сталкиваются организации в рамках использования технологий беспилотных дронов в логистике. Описаны перспективы развития технологий Drone Network в международном и российском рынке. Проанализированы перспективы применения беспилотных дронов, управляемых технологиями машинного обучения, в рамках развития портовой деятельности, внутрипортовой логистики и для поиска бедствующих кораблей.

Ключевые слова: транспортная логистика, интеллектуальные технологии, транспортно-логистические процессы, технические средства, дроны, квадрокоптеры, портовая деятельность.

Application of machine learning technologies for Drone Network in logistics and port activities of Russia

Oleg M. Mikhov¹, e-mail: mikhas95@gmail.ru, Natalia V. Shatalova¹, e-mail: shatillen@mail.ru,

Olga V. Borodina¹, e-mail: borodinaov@gmail.ru, Yuri I. Vasilev², e-mail: yuvas890@gmail.com

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, ²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The scientific article is devoted to the research analysis of the features of the practical use of unmanned drones and frame copters in the framework of the transport logistics of goods and orders by foreign companies. The relevance of the study is due to the fact that Drone Network technologies allow solving the main problem of logistics - to optimize financial costs by reducing the cost of implementing supply chains. Perhaps this is helping the integration of logistics, drones and machine learning technology. The article discusses the theoretical aspects of the concept of the "Drone Network" technology. Analyzed foreign experience and international trends in the use of unmanned drones in the formation of the supply chain of logistics enterprises. The key advantages that these technologies provide in improving the transport logistics of companies are considered. The prospects for the development of Drone Network technologies on the territory of the Russian Federation are analyzed. The main problems that hinder their practical application by Russian companies are considered. The paper analyzes the shortcomings faced by organizations in the use of unmanned drone technologies in logistics. The prospects for the development of Drone Network technologies in the international and Russian markets are described. The prospects for the use of unmanned drones controlled by machine learning technologies in the development of port activities, intra-port logistics and for the search for distressed ships are analyzed.

Keywords: transport logistics, intelligent technologies, transport and logistics processes, technical means, drones, quadcopters, port activities.

Введение

Современный этап бизнес-деятельности практически каждой компании имеет высокую степень зависимости от эффективности функционирования транспортно-логистического комплекса, отвечающего за процессы поставки сырья, реализации продукции и управления складскими запасами [1], [2], [3], [4], [5].

Благодаря эффективному функционированию системы транспортной логистики предприятия имеют возможность:

- увеличивать скорость оборачиваемости средств;

- формировать высокий уровень ликвидности баланса;

- обеспечивать необходимый объем товарно-материальных ценностей для операционного цикла организации.

И, чтобы данные процессы совершенствования системы управления транспортной логистикой организации были максимально эффективны, принято применять различные информационные технологии и инновации, одно из первых мест из которых занимает Drone Network (дроны, квадрокоптеры и т.д.).

Актуальность научного исследования обусловлена тем, что технологии Drone Network позволяют решить основную проблему логистики –

провести оптимизацию финансовых расходов, путем сокращения затрат на реализацию цепочек поставок.

Практическое использование беспилотных дронов, в первую очередь, обусловлено развитием высокоинтеллектуальных технологий, среди которых присутствует машинное обучение. Построение систем машинного обучения является одной из самых популярных, актуальных и современных областей цифровизации логистической деятельности в России на стыке информационных технологий, математического анализа и статистики.

1. Основные задачи машинного обучения

Машинное обучение все глубже проникает в бизнес-процессы российских логистических организаций посредством пользовательских продуктов, созданных с помощью методов искусственного интеллекта. Очевидно, что данные технологии будут развиваться и дальше, постепенно становясь частью операционной деятельности любого бизнеса. Однако, в рамках совершенствования логистики, машинное обучение становится актуальным инструментом, практическая польза которого интеллектуализация и автоматизация системы управления полетами дронов.

По этой причине, целью научной статьи выступает проведение исследовательского анализа особенностей практического использования беспилотных дронов и квадрокоптеров в рамках транспортной логистики грузов и заказов зарубежными компаниями в условиях развития технологии машинного обучения.

Для этого в рамках научного исследования необходимо решение следующих актуальных задач, среди которых:

- рассмотреть теоретические аспекты понятия технологии «Drone Network»;
- проанализировать зарубежный опыт и международные тенденции в использовании беспилотных дронов при формировании цепочки поставок логистики предприятий;
- рассмотреть ключевые преимущества, которые предоставляют данные технологии в совершенствовании транспортной логистики компаний;
- проанализировать перспективы развития технологий Drone Network на территории Российской Федерации;
- рассмотреть основные проблемы, препятствующие их практическому применению российскими компаниями;
- проанализировать недостатки, с которыми сталкиваются организации в рамках использования технологий беспилотных дронов в логистике;
- описать перспективы развития технологий Drone Network в международном и российском рынке;
- проанализировать перспективы применения беспилотных дронов, управляемых технологиями машинного обучения, в рамках развития портовой деятельности, внутрипортовой логистики и для поиска бедствующих кораблей.

2. Перспективы использования

Гражданские беспилотные летательные аппараты (дроны) начали лавинообразно набирать популярность в начале 2010-х годов.

Своей массовой популярностью дроны обязаны развитию беспроводных сетей. Другими определяющими факторами стали мощные компьютеры, способные контролировать сложные устройства, а также появление новых, более совершенных языков программирования [6].

В прогнозе компании Business Insider, опубликованном в 2014 году, рынок гражданских беспилотных летательных аппаратов в 2020 году оценивался в 1 млрд долларов США, но уже два года спустя эта оценка была повышена до 12 млрд долларов США.

По данным «New York Times», в 2016 году в США было продано 2,8 млн гражданских беспилотных летательных аппаратов на общую сумму 953 млн долларов США.

Мировой объем продаж составил 9,4 млн беспилотных летательных аппаратов суммарной стоимостью порядка 3 млрд долларов США.

Аудиторская компания PwC оценивала рынок беспилотных летательных аппаратов в 2020 году и он составил 127 млрд долларов США. По их оценке, большая часть (около 61%) беспилотных летательных аппаратов будет использоваться в обслуживании инфраструктурных проектов, в сфере сельского хозяйства и агропромышленного производства [7].

Согласно определению, одобренному Ассамблеей ИКАО: беспилотный летательный аппарат (дрон) представляет собой воздушное судно без пилота, которое выполняет полет без командира воздушного судна на борту и либо полностью дистанционно управляется из другого места с земли, с борта другого воздушного судна, из космоса, либо запрограммировано и полностью автономно в функционировании [8].

В периоде 2020-2021 гг. главным фактором развития дронов в Российской Федерации является сокращение их рыночной стоимости. Это связано по следующим причинам [9]:

- во-первых, удешевлением компонентов, которые используются при разработке и сборе продукции беспилотных летательных аппаратов;
- во-вторых, выходом на рынок гражданских дронов новых компаний, в том числе тех, которые ранее акцентировали свое производственное внимание лишь на военные потребности.

Как итог, данные причины приводят к тому, что цены на беспилотные летательные аппараты снижаются и это происходит в основном на потребительские дроны. К тому же, на рынок военных дронов выходят новые производители, к примеру, из Китая, которые изменяют денежную и долевую структуру рынка беспилотных летательных аппаратов. Такие изменения стоит считать положительным фундаментальным фактором, ведь чем дешевле будет стоимость дронов, тем более вероятно будет наблюдаться развитие отрасли Drone Network на территории Российской Федерации.

Касаемо российского рынка беспилотных летательных аппаратов, то по итогам 2017 года наша страна занимала 3% в количестве и 2% в стоимости мирового рынка. При этом в сегменте военных беспилотных летательных аппаратов ее долякратно выше (около 15%).

В 2017 году российский рынок беспилотных летательных аппаратов в денежном выражении

оценивался примерно в 163 млн долларов США (около 9,5 млрд рублей), а к 2020 году его рост составил примерно 50%.

По оценке J'son & Partners Consulting, доля дронов отечественного производства на рынке Российской Федерации составила в 2017 году 10% и увеличится к 2020 году до 11%.

Основной прирост приходится на коммерческий сегмент, где ожидается большая активность российских производителей, и он увеличится в 2 раза к текущему уровню.

До 40% коммерческих дронов, продаваемых на территории России, будут отечественного производства. По мнению большинства экспертов, дроны будут еще достаточно длительное время играть вспомогательную роль в мировой логистике. Скорее всего, в ближайшем будущем дроны и традиционные виды транспортных средств будут использоваться совместно.

3. Анализ практики применения беспилотных летательных аппаратов зарубежными и отечественными компаниями

Далее в рамках научного исследования проведем анализ практики применения беспилотных летательных аппаратов зарубежными и отечественными компаниями при совершенствовании операционной деятельности, в том числе и логистики.

Компании, внедряющие дроны в логистике: Amazon, Dodo, DHL, UPS и др. В основном их использование касается доставки небольших посылок (весом до 8 кг) на небольшие расстояния, как правило, на участке маршрута, называемом в логистике «последней милей».

Дроны позволяют логистическим службам не только сократить расходы на «последнюю милю» (самую дорогую часть доставки), но и доставлять посылки в труднодоступные места. Недавно сервис мирового гиганта экспресс-доставки – компании UPS успешно протестировал беспилотных летательных аппаратов для доставки грузов на последнем километре цепи поставок [10].

В будущем такой способ транспортировки может быть использован для доставки посылок в географически изолированную местность. При этом такая транспортировка потребует меньших человеческих ресурсов и меньших финансовых затрат. В частности, запуск дрона от грузовой машины или с морского судна для завершения сложной доставки может сократить количество дорогостоящих километров.

Кроме того, использование дронов с электроприводом намного более безопасно для экологии, нежели использование грузовиков с бензиновым двигателем. Компания Amazon.com приобрела патент на крупный высоколетный дирижабль, который может быть использован для размещения дронов и последующей доставки товаров клиентам Amazon. Дирижабль, который окрестили «матерью дронов», управляется людьми, но доставка индивидуальных посылок таким способом потребует меньше энергии, чем доступные альтернативы.

В частности, патент создает гипотетическую возможность применения «матери дронов» на

спортивных стадионах для немедленной доставки еды и напитков зрителям во время матчей.

В Университете города Шербрука в канадской провинции Квебек представили дрон, который в автономном режиме может садиться на вертикальные поверхности, а именно, стены зданий, отвесные скалы, стволы деревьев.

Дрон S-MAD – это маленький самолет, он летает со скоростью порядка 7–10 м/с и не может, в отличие от квадрокоптера, зависнуть на месте. Когда ему надо приземлиться, лазерный датчик обнаруживает препятствие – вертикальную поверхность – и дает команду замедлиться и задраить нос.

Аппарат останавливается параллельно стене, снижает скорость и цепляется за стену своим «шасси», т.е. зацепами из микрофибры, которые как бы прилипают к любой шероховатой поверхности, а специальная подвеска гасит кинетическую энергию от удара.

Логистический оператор компания DHL начала работать над доставкой посылок дронами гораздо раньше Amazon. Она даже доставила посылку в фармацевтическую компанию, расположенную на острове в Германии, используя свой parcelcopter. Parcelcopter был представлен публике в мае 2016 года. В рамках тестовых испытаний дрон доставил 130 посылок в различных температурных и климатических условиях [11].

В консалтинговой компании McKinsey ожидают, что в будущем дроны и беспилотные автомобили будут доставлять до 80% всех посылок. Усилия компании Amazon по заданию новых стандартов онлайн-торговли с помощью дронов и попытки перейти от доставки «день-в-день» к доставке «час-в-час» продолжают привлекать внимание всего мира. Однако, не считая онлайн-торговли, есть целый перечень отраслей, которые могут существенно измениться благодаря дронам.

На самом деле многие из этих отраслей уже затронуты этой дрон-революцией, например, сельское хозяйство, кинематограф, фотография, проверки различных труднодоступных объектов.

3PL-провайдер Geodis совместно с Delta Drone (международным игроком в области гражданских беспилотных летательных аппаратов для профессионального использования) разработали полностью автоматическое решение для пополнения и инвентаризации складских запасов с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Комплект состоит из наземного робота, оснащенного батареей, которая обеспечивает энергию, необходимую для навигации по складу, и позволяет достичь желаемой автономности, а также бесшумного дрона-квадроцикла с четырьмя камерами высокой четкости.

С точки зрения информационных технологий и систем, решение позволяет рассчитывать и сообщать данные о товарных остатках в режиме реального времени, а также обрабатывать данные и интегрировать их с информационной системой склада. Тесты, проведенные на начальном этапе разработки, показывают, что надежность инвентаризации товарных запасов близка к 100 процентной эффективности.

Крупнейший мировой ритейлер компания Walmart вообще намерена использовать дроны не в доставке,

что сопряжено с регуляторными трудностями, а внутри крупных складов и логистических/распределительных центров.

18 мая 2020 года компания EY опубликовала результаты исследования российского рынка беспилотных летательных аппаратов. Эффект от использования дронов, по мнению экспертов, в стране превышает 1 млрд долларов США, однако, их внедрение ограничено из-за проблем с инфраструктурой и регулированием.

4. Перспективы использования

Учитывая территории и неравномерное развитие инфраструктуры, эффект от использования беспилотников в РФ может быть больше, чем во

многих других странах. Российские производители предлагают продукты мирового уровня, но столкнувшись с многочисленными ограничениями, часто вынуждены ориентироваться на зарубежные рынки. Адаптация регулирования и использование гражданской инфраструктуры может ускорить раскрытие рынка.

На рисунке 1 изображена интересная статистика по странам осуществляемых наиболее крупные объемы финансовых инвестиций в реализацию проектов, направленных на создание и применение беспилотных летательных аппаратов в логистической деятельности.

Страны по объему инвестиций в проекты БВС

\$ млн долл. США



Количество проектов

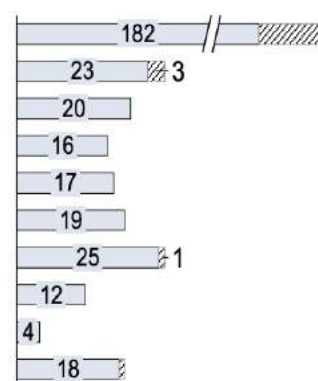


Рис. Страны по объему инвестиций в проекты дронов для применения в логистике [12]

На первом месте находится США (2,475 млрд долларов США инвестиций), а далее за ним Китай (448 млн долларов США инвестиций), Япония (129 млн долларов США инвестиций) и Израиль (118 млн долларов США инвестиций). России в списке 10 крупнейших стран по финансовым вложениям в инвестиционные проекты по созданию и применению дронов для логистики нету.

Несмотря на это, российский рынок Drone Network демонстрирует устойчивые тенденции роста, масштабирования, появления новых производителей и увеличения числа услуг и примеров того, как крупнейшие торговые и производственные компании используют беспилотные летательные аппараты в совершенствовании логистики.

На сегодняшний день, основными производителями дронов в России выступают следующие компании:

- Zala Aero Group;
- ООО "Беспилотные системы";
- Ижевские беспилотные системы (Ижмаш БС);
- "Истринский Экспериментальный Механический Завод";
- ООО "АЭРОКОН";
- ООО "Специальный технологический центр";
- Вектор НИИ;
- ООО «Локационная мастерская» («Локмас»);
- Сибер;
- UVL Robotics (ЮВЛ Роботикс).

Если анализировать опыт применения беспилотных летательных аппаратов в России, то

наиболее успешным примером и бизнес-кейсом выступает компания «Газпром нефть», которая использует дроны для доставки грузов на месторождения. Первый беспилотник, запущенный компанией в 2017 году, пролетел 40 км и доставил на удаленное месторождение груз весом в 4,5 кг.

В «Газпром нефти» планируют использовать дроны для доставки грузов на автономные промыслы, с которыми весной и осенью просто нет никакого наземного сообщения. Это тоже часть процесса повышения эффективности: себестоимость полета дрона в десятки раз ниже, чем пилотируемого вертолета, да и летать он способен в более сложных погодных условиях, не подвергая риску жизни людей [13].

При этом, по оценкам исследователей компании Marketsand Markets, рынок «подключенной» логистики в 2021 году составит 41 млрд долларов США, а среднегодовой темп его роста – около 33%. Такие тенденции не могут не повлиять положительно на динамику развития Drone Network на территории России.

Подогревает интерес к новым технологиям у крупных логистов и магазинов заметное снижение издержек. Например, компания Amazon с помощью роботов для отбора и упаковки товаров на складе смогла снизить операционные расходы на 20%, сэкономя на каждом из 13 складов, где они установлены, по 22 млн долларов США. А если такие роботы появятся на всех складах компании, которых сегодня уже больше ста, то компания Amazon, по

мнению финансовых экспертов и аналитиков, сможет сэкономить 800 млн долларов [13].

При всей перспективности использования дронов для доставки последней мили есть проблемы, которые пока не решены. По нашему мнению, из-за этих проблем существуют барьеры развития рынка беспилотных летательных аппаратов в применении логистической системой России [14].

Первое – страховка дрона и груза.

Второе – сбои в навигации (радиопомехи в городской среде, ветер).

Третье – отсутствие гарантии, что посылка заберет именно тот, кому она предназначена.

Для российского рынка важнейшей проблемой ранее выступали законодательные ограничения, которые не позволяли использовать потребительские и коммерческие дроны в целях логистики внутри городов и других населенных пунктов.

Буквально недавно, 8 июня 2021 года Госдума в третьем (окончательном) чтении приняла закон об отмене лицензирования разработки, производства, испытаний и ремонта легких дронов (массой до 30 кг).

Прежде лицензированию подлежали разработка, производство, испытание и ремонт любой авиационной техники. Производители дронов в связи с этим сталкивались с большими сложностями, потому что в этих требованиях содержатся устаревшие технические регламенты. Беспилотники обладают совершенно новой конструкцией и под старые критерии не подходят.

5. Основные трудности использования в РФ

Также существует определенный ряд недостатков, который тормозит развитие беспилотных летательных аппаратов и дронов в применении компаниями зарубежья и России:

1. Трудности обеспечения конфиденциальности и информационной безопасности.

2. Наличие законодательных актов, которые все еще ограничивают раскрытие всего потенциала в использовании беспилотных летательных аппаратов.

3. Проблемы, которые могут возникнуть в воздухе. В первую очередь, речь идет про возможное попадание птиц в лопасти летательных беспилотных аппаратов.

4. Проблемы, которые могут возникнуть на земле. В первую очередь, речь идет про проявление вандализма и возможной кражи беспилотных летательных аппаратов.

5. Трудности при взаимодействии с природой. Из-за своих физических возможностей и размеров дроны могут не преодолеть определенные погодные условия, что сорвет доставку груза.

Несмотря на это, развитие Drone Network и беспилотных летательных аппаратов в экономике и торговой сфере Российской Федерации могут привести к ряду преимуществ, среди которых:

1. Оптимизация финансовых расходов при проведении логистических процессов.

Дело в том, что на данный момент многие малые и средние фирмы российской экономики имеют более 15-20 процентов от всей структуры расходов именно затраты на проведение логистики.

Применение дронов позволяет сократить финансовые расходы на осуществление процессов в

управлении цепочек поставок. Тем самым, будут сокращена и стоимость транспортных услуг по доставке продукции. Например, для торговых организаций это означает возможность увеличить свои объемы продаж, что напрямую влияет на итоговый финансовый результат бизнес-деятельности.

2. Исключение человеческого фактора. Речь идет не только про то, что многие ошибки и трудности, вызванные человеческим фактором, теперь будут устранены. Но и тем, что именно исключение людей в управлении доставкой и цепочек поставок может позволить провести успешно процедуру оптимизации финансовых расходов при проведении логистических процессов.

3. Экологичность. На сегодняшний день одной из проблем развития сферы транспортной логистике во всем мире и в России является загрязнение окружающей среды. Компании и государства ставят следующую задачу: снизить выброс парниковых газов и других отходов жизнедеятельности людей и организаций путем внедрения и использования зеленых технологий и энергии. Практическая эффективность ориентация бизнес-модели компаний на экологичность позволяет повышать конкурентоспособность, имидж и стоимость бренда.

Летательные беспилотные аппараты – это именно то направление развития транспортной инфраструктуры логистики, благодаря которой реализация концепции устойчивого развития российскими компаниями может быть соблюден.

4. Гибкость в цепи поставок.

Автономность беспилотных летательных аппаратов позволяет корректировать курсы в случае необходимости, форс-мажорных обстоятельств или при определенных требованиях клиента. Скорость реагирования на изменение условий заказа очень высока, что повышает эффективность логистических процессов.

Главным фактором развития дронов в логистике российской экономики и торговых организаций может выступать формирование комплексной рыночной инфраструктуры (сети дронов), что является основой Drone Network.

Создание сети дронов (Drone Network) заключается в использовании небольших дронов для мониторинга, транспорта, управления безопасностью и стихийными бедствиями и в других сферах [15].

Можно предположить следующее, что комплекс различных небольших дронов способен образовать автономные сети, которые будут включены в воздушное движение. При это самое движение будет описываться, как высокоуровневая архитектура для проектирования совместной воздушной системы, состоящей из дронов со встроенными датчиками и встроенными возможностями обработки, координации и работы в сети.

Данную технологию (Drone Network) можно внедрить, как систему с несколькими дронами, состоящую из квадрокоптеров, и демонстрируя ее потенциал в реализации задач, стоящих перед транспортной логистикой и управления цепочками поставок [16].

Дело в том, что по причине быстрого постоянного роста рынка дронов и беспилотных летательных аппаратов происходит расширение диапазона

приложений ограничения, связанных с полетом на короткие расстояния и нестабильностью сигнала, вызванные существующими решениями для связи точка-точка дронов, становятся все более заметными.

В то же время частые случаи несанкционированных полетов и происшествий с дронами, связанные с безопасностью, также вызывают острую необходимость в нормативной политике, и настоятельно необходимо развитие сетевого взаимодействия дронов, что подразумевает перспективы развития Drone Network в России [17].

Например, сеть беспилотных летательных аппаратов, подключенная к сети мобильной связи на малых высотах, может обеспечивать наблюдение за оборудованием, стандартизацию маршрутов полета и повышение эффективности, а также способствовать рациональному использованию воздушного пространства, тем самым значительно расширяя область применения беспилотных летательных аппаратов и создавая большую экономическую ценность [18].

Вероятнее всего, что в кратчайшие сроки будут усовершенствованы правила управления полетами беспилотных летательных аппаратов, будет уточнен основной орган управленческой ответственности, будет упрощен процесс подачи заявок на воздушное пространство и утверждения, а также будет продолжено построение системы управления полетами и обслуживания. Тем самым, будет сформирована полноценная инфраструктура функционирования и деятельности сети дронов.

Еще одним направлением перспективы развития применения беспилотных дронов на территории Российской Федерации является использование данных технологий, управляемых машинным обучением, в рамках становления портовой деятельности, внутрипортовой логистики и для поиска бедствующих кораблей.

Например, применение дронов в портовой деятельности и внутрипортовой логистике способствует достижению таких задач:

- повышение эффективности внутрипортовых логистических процессов;
- автоматизация внутрипортовой логистики с целью минимизации времени на отгрузку и загрузку;
- автоматизация внутрипортовой логистики с целью оптимизации финансовых и трудовых ресурсов;
- повышение уровня личной безопасности персонала, принимающего участия во внутрипортовых логистических процессах отгрузки и погрузки.

Беспилотные летательные аппараты и дроны предоставляют возможность наблюдать за большой территорией с высоты птичьего полета, быстро и безопасно управлять, инспектировать и контролировать портовую инфраструктуру. Поскольку многие порты имеют высокий размер своей площади, а затраты на рабочий и обслуживающий персонал входят в себестоимость портовых, логистических и таможенных услуг, автоматизация и роботизация при помощи практического применения беспилотных дронов увеличит экономическую эффективность внутрипортовой деятельности и логистики [18].

Кроме того, беспилотные дроны можно использовать с целью поиска потерявшихся кораблей, когда корабль выступает базой. На примере морского порта Гамбурга установлено высокие перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при устранении последствий различных бедствий.

К тому же, дополнительным направлением применения беспилотных дронов в форс-мажорных ситуациях является поиск бедствующих кораблей или обнаружение стихийных бедствий с помощью технологии Drone Network.

Например, беспилотные летательные аппараты могут использоваться не только в рамках инспекций инфраструктурных объектов портовой логистики, проводить наблюдение, но и участвовать в управлении кризисными ситуациями, следить за операциями на причалах и помогать в обнаружении разливов нефтепродуктов или плавающего в акватории мусора.

На сегодняшний день, зарубежные исследования в портах Антверпена и Гамбурга отражают положительные результаты тестирования технологий беспилотных дронов в различных вариантах и сценариях применения при решении задач в условиях реальной и сложной среды. Благодаря этому происходит содействие выполнения задач по обеспечению функций подразделения безопасности и охраны порта.

В рамках проекта PORTwings администрация порта Гамбург в периоде 2020-2021 годов изучает возможности использования беспилотных летательных дронов, которые могут работать полностью автономно посредством «коллективного интеллекта».

Развитие технологии «коллективного интеллекта», в первую очередь, возможно благодаря искусственному интеллекту и машинному обучению. Практическим преимуществом последней технологии является то, что каждый процесс поиска и обнаружения кораблей в стихийных бедствиях в открытой воде является базовой информацией, анализ которой позволяет в следующих ситуациях принимать более точные и оперативные решения полета в определенные зоны, где нахождение подобных транспортных средств в разы выше. Машинное обучение – это не только средство повышения эффективности, но и способ увеличения безопасности морской логистики, внутрипортовой логистики и деятельности портов во всем мире, включая в России.

Уже сейчас в порту Гамбурга, для примера, используются беспилотные летательные дроны в различных областях, как:

- защита от стихийных бедствий;
- мониторинг строительства;
- контроль труднодоступных объектов в порту.

В случае наводнений, происшествий или других непредвиденных событий, беспилотные летательные аппараты – дроны способны прибывать на место инцидента гораздо быстрее автомобилей или судов портового флота, снимать на видео и фотографировать происходящее. Вся важная информации может мгновенно передаваться ответственным лицам для принятия необходимых мер реагирования.

Кроме того, беспилотные дроны повышают эффективность содержания и проектов расширения портовой инфраструктуры. Это касается как инспекций состояния зданий и сооружений, так и обследования труднодоступных или опасных мест. Уже сейчас, например, администрация порта обследует с помощью дронов состояние очистных сооружений.

Данные от сенсоров на дронах и аэровидеосъемка поступают в центр управления дронами в режиме реального времени, объединяется в общую картинку и направляется профильным специалистам. Интервалы между полетами дронов зависят от состояния конкретных объектов, которые необходимо проверять. Это дает возможность быть уверенными в постоянной готовности инфраструктуры и снижает затраты на ее обследование и содержание.

Заключение

1. Гражданские беспилотные летательные аппараты (дроны) начали лавинообразно набирать популярность в начале 2010-х годов. Своей массовой популярностью дроны обязаны развитию беспроводных сетей. Другими определяющими факторами стали мощные компьютеры, способные контролировать сложные устройства и появление новых, более совершенных языков программирования.

2. На сегодняшний день в периоде 2020-2021 гг. главным фактором развития дронов в Российской Федерации является сокращение их рыночной стоимости. Это связано с следующими причинами: во-первых, удешевлением компонентов, которые используются при разработке и сборе продукции беспилотных летательных аппаратов; во-вторых, выходом на рынок гражданских дронов новых компаний, в том числе тех, которые ранее акцентировали свое производственное внимание лишь на военные потребности.

3. Компании, внедряющие дроны в логистике: Amazon, Dodo, DHL, UPS и др. В основном их использование касается доставки небольших посылок на небольшие расстояния, как правило, на

участке маршрута, называемом в логистике «последней милей». Дроны позволяют логистическим службам не только сократить расходы на «последнюю милю», но и доставлять посылки в труднодоступные места.

4. В консалтинговой компании McKinsey ожидают, что в будущем дроны и беспилотные автомобили будут доставлять до 80% всех посылок.

5. Российский рынок Drone Network демонстрирует устойчивые тенденции роста, масштабирования, появления новых производителей и увеличения числа услуг и примеров того, как крупнейшие торговые и производственные компании используют беспилотные летательные аппараты в совершенствовании логистики.

6. Существует определенный ряд недостатков, который тормозит развитие беспилотных летательных аппаратов и дронов в применении компаниями зарубежья и России: трудности обеспечения конфиденциальности и информационной безопасности; наличие законодательных актов, которые все еще ограничивают раскрытие всего потенциала в использовании беспилотных летательных аппаратов; проблемы, которые могут возникнуть в воздухе; проблемы, которые могут возникнуть на земле; трудности при взаимодействии с природой.

7. Преимуществами применения беспилотных летательных аппаратов в логистике России могут выступать оптимизация финансовых расходов, исключение человеческого фактора, экологичность и гибкость в цепи поставок.

8. Формирование Drone Network и его развитие в России заключается в создании сети дронов и беспилотных летательных аппаратов, функционирование и взаимодействие которых будет автоматизировано с помощью цифровых сервисов, создающих общую систему инфраструктуры рынка, где будут обеспечены информационная безопасность, технологическая безопасность и экономическая целесообразность полетов дронов.

Литература

1. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Шаталова Н.В., Асаул А.Н. Когнитивная экономика и транспорт // Технологии построения когнитивных транспортных систем: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН. 2018. С. 21-29.
2. Шаталова Н.В., Михов О.М., Бородин О.В. Потенциал развития логистики Арктической зоны РФ за счет применения дронов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1, № 2. С. 137-145.
3. Малыгин И.Г., Макоско А.А., Цыганов В.В. и др. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и три этапа развития до 2050 года. – М.: ИПТ РАН, 2019. – 465 с.
4. Михов О.М., Шаталова Н.В. Применение методов машинного обучения в российской логистике // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2020. –Т.1. – С. 83–86
5. Шаталова Н.В. Развитие транспортной отрасли как основополагающей при решении проблем стратегического и экономического характера // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2017. – Т.1. – С. 230–233.
6. Гранкин Е. Дроны в логистике // Логистика. 2019. № 1 (146). С. 14-16.
7. Фиговский О., Гумаров В. Беспилотные транспортные средства: развитие технологий и место в мировом сообществе // ELGA – научно-культурологический журнал. 2018. № 5 [338]. URL: <http://www.relga.ru/Environ/WebObjects/tgu-www.woa/wa/Main?textid=5393&level1=main&level2=articles> (дата обращения: 17.06.2021).
8. Костин А.С. Современные тенденции развития складской логистики с учетом применения дронов // Системный анализ и логистика. 2021. № 2 (28). С. 20-25.
9. Кахриманова Д.Г., Коптельникова К.Б., Евдокимова В.Е. Дроны – новая технология оптимизации складского хозяйства // Инновационная экономика и современный менеджмент. 2019. № 3. С. 22-24.

10. Курбанов Т., Старченко Д., Заикин А. Дроны в логистике: опыт ведущих зарубежных и отечественных компаний, перспективы и проблемы применения // *Логистика*. 2020. № 2 (159). С. 26-29.
11. Сергеев В.И. Логистика и управление цепями поставок – профессия XXI века: аналитический обзор // *Логистика и управление цепями поставок*. 2019. № 6 (89). С. 3-30.
12. Развитие рынка беспилотных летательных аппаратов. URL: https://www.tadviser.ru/images/6/62/2_5341364085428586100.pdf (дата обращения: 17.06.2021).
13. Снабжение: роботы и дроны на страже логистических цепочек. URL: <http://digital-russia.rbc.ru/articles/snabzhenie-roboty-i-drony-na-strazhe-logisticheskikh-tsepochek/> (дата обращения: 17.06.2021).
14. Дроны для логистики: полет в небе, проблемы на земле. URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/opinions/drony-dlya-logistiki-polet-v-nebe-problemy-na-zemle/> (дата обращения: 17.06.2021).
15. M. M. Kurdi Hybrid communication network of mobile robot and Quad-copter // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2017. №1. С. 69-74.
16. An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability / H. Fesenko, V. Kharchenko, A. Sa-chenko, R. Hiromoto, V. Kochan // *Dependable IoT for human and industry modeling, architecting, implementation*. Denmark, The Netherlands: River Publishers, 2018. P. 197-217.
17. Fujii, K. Endless flyer: a continuous flying drone with automatic battery replacement / K. Fujii, K. Higuchi, J. Rekimoto // *Ubiquitous Intelligence and Computing*. 2013. P. 216-223.
18. Shinkuma, R. Design of ad hoc wireless mesh networks formed by unmanned aerial vehicles with advanced mechanical automation / R. Shinkuma, N. B. Mandayam. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.07428> (дата обращения: 07.07.2021).

References

1. Maligin I.G., Komashinskiy V.I., SHatalova N.V., Asaul A.N. Kognitivnaya ekonomika i transport [Cognitive Economics and Transport] // *Tehnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. – SPb.: IPT RAN. 2018. S. 21-29.
2. SHatalova N.V., Mihov O.M., Borodina O.V. Potencial razvitiya logistiki Arkticheskoi zoni RF za schet primeneniya dronov [Potential of development of logistics of the Arctic zone of the Russian Federation due to the use of drones] // *Morskie intellektualnie tehnologii*. 2021. T. 1, № 2. S. 137-145.
3. Maligin I.G., Makosko A.A., Ciganov V.V. i dr. Infrastruktura Sibiri, Dalnego Vostoka i Arktiki. Sostoyanie i tri etapa razvitiya do 2050 goda [Infrastructure of Siberia, the Far East and the Arctic. Status and three stages of development until 2050]. – M.: IPT RAN, 2019. – 465 s.
4. Mihov O.M., SHatalova N.V. Primenenie metodov mashinnogo obucheniya v rossiiskoi logistike [Application of machine learning methods in Russian logistics] // *Modernizatsiya i nauchnie issledovaniya v transportnom komplekse*. 2020. T.1. S. 83–86
5. SHatalova N.V. Razvitie transportnoi otrasli kak osnovopolagayush'ei pri reshenii problem strategicheskogo i ekonomicheskogo haraktera [Development of the transport industry as fundamental in solving strategic and economic problems] // *Modernizatsiya i nauchnie issledovaniya v transportnom komplekse*. – 2017. – T.1. – S. 230–233.
6. Granin E. Droni v logistike [Drones in Logistics] // *Logistika*. 2019. № 1 (146). S. 14-16.
7. Figovskii O., Gumarov V. Bepilotnie transportnie sredstva: razvitie tehnologii i mesto v mirovom soobsh'estve // *ELGA – nauchno-kulturologicheskii zhurnal*. 2018. № 5 [338]. [Unmanned vehicles: technology development and place in the global community]. URL: <http://www.relga.ru/Environ/WebObjects/tgu-www.woa/wa/Main?textid=5393&level1=main&level2=articles> (дата обращения: 17.06.2021).
8. Kostin A.S. Sovremennye tendentsii razvitiya skladskoi logistiki s uchetom primeneniya dronov [Modern trends in the development of warehouse logistics taking into account the use of drones] // *Sistemnyi analiz i logistika*. 2021. № 2 (28). S. 20-25.
9. Kahrmanova D.G., Koptelnikova K.B., Evdokimova V.E. Droni – novaya tehnologiya optimizatsii skladskogo hozyaistva [Drones - a new technology for optimizing warehousing] // *Innovatsionnaya ekonomika i sovremennii menedzhment*. 2019. № 3. S. 22-24.
10. Kurbanov T., Starchenko D., Zaikin A. Droni v logistike: opit vedush'ih zarubezhnykh i otechestvennykh kompanii, perspektivi i problemi primeneniya [Drones in logistics: experience of leading foreign and domestic companies, prospects and problems of application] // *Logistika*. 2020. № 2 (159). S. 26-29.
11. Sergeev V.I. Logistika i upravlenie cepyami postavok – professiya XXI veka: analiticheskii obzor [Logistics and Supply Chain Management - 21st Century Profession: Analytical Overview] // *Logistika i upravlenie cepyami postavok*. 2019. № 6 (89). S. 3-30.
12. Razvitie rinka bepilotnykh letatelnykh apparatov [Development of the unmanned aerial vehicle market.]. URL: https://www.tadviser.ru/images/6/62/2_5341364085428586100.pdf (дата обращения: 17.06.2021).
13. Snabzhenie: roboty i droni na strazhe logisticheskikh tsepochek [Supplies: robots and drones on the guard of supply chains]. URL: <http://digital-russia.rbc.ru/articles/snabzhenie-roboty-i-drony-na-strazhe-logisticheskikh-tsepochek/> (дата обращения: 17.06.2021).
14. Droni dlya logistiki: polet v nebe, problemi na zemle [Drones for logistics: flight in the sky, problems on the ground]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/opinions/drony-dlya-logistiki-polet-v-nebe-problemy-na-zemle/> (дата обращения: 17.06.2021).
15. M. M. Kurdi Hybrid communication network of mobile robot and Quad-copter // *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika*. 2017. №1. S. 69-74.

16. An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability / H. Fesenko, V. Kharchenko, A. Sa-chenko, R. Hiromoto, V. Kochan // Dependable IoT for human and industry modeling, architecting, implementation. Denmark, The Netherlands: River Publishers, 2018. P. 197-217.
17. Fujii, K. Endless flyer: a continuous flying drone with automatic battery replacement / K. Fujii, K. Higuchi, J. Rekimoto // Ubiquitous Intelligence and Computing. 2013. P. 216-223.
18. Shinkuma, R. Design of ad hoc wireless mesh networks formed by unmanned aerial vehicles with advanced mechanical automation / R. Shinkuma, N. B. Mandayam. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.07428> (data obrash'eniya: 07.07.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Михайлович Михов, младший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 e-mail: mikhas95@gmail.ru

Oleg M. Mikhov, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: mikhas95@gmail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 e-mail: shatillen@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Phd, Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: shatillen@mail.ru

Ольга Владимировна Бородина, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 e-mail: borodinaov@gmail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: borodinaov@gmail.ru

Юрий Иванович Васильев, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Портов и грузовых терминалов, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: yuvas@gmail.com

Yuri I. Vasilev, Associate professor, Ph.D.(Eng.), professor of the Department of Ports and cargo terminals, Admiral Makarov State University of Maritime and inland Shipping, Dvinskaya st., 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: yuvas890@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.09.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 629.123

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.047>

Формирование траекторий движения безэкипажного судна

А.С. Корнев¹, e-mail: alexey.korenev@sitronics-kt.ru С.П. Хабаров², e-mail: serg.habarov@mail.ru,
А.Г. Шпекторов³, e-mail: agshpectorov@etu.ru

¹АО «Ситроникс КТ», ²Санкт-Петербургский государственный лесной технический университет,
³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Аннотация Рассматривается проблема определения маршрута движения безэкипажного судна с учетом жестких требований контроля положения и курса судна. Современные электронно-картографические навигационно-информационные системы в режиме управления траекторией определяют точку поворота для выхода на новый участок маршрута, что недостаточно для управления безэкипажным судном в автономном режиме. Для повышения точности предложено проводить расчет траектории движения безэкипажного судна в географических координатах с учетом движения судна по радиусу поворота между участками траектории без перевода в прямоугольную систему координат. Показано, что при движении в свободной акватории проблема может быть сведена к решению обратной геодезической задачи. Предложен универсальный алгоритм расчета траектории в виде сегментов дуг большого круга, позволяющий получить путевые точки маршрута с любой заданной точностью. В случае возникновения ограничений на движение между двумя участками по внутреннему радиусу необходимо рассчитать альтернативный маршрут обхода препятствия. Для данного случая предложен расчетный маневр, полученный на основе решения задачи Дубинса. Альтернативный маршрут формируется в виде последовательности криволинейных сегментов, соответствующих заданному радиусу поворота. Алгоритм расчета путевых точек позволяет получить траекторию обхода препятствия с любой степенью детализации.

Ключевые слова: Безэкипажное судовождение, управление траекторией, ортодромия, планирование маршрута, навигация, путевые точки, сферическая геодезия, машина Дубинса.

A route calculation for unmanned vessel

Alexei S. Korenev¹, e-mail: alexey.korenev@sitronics-kt.ru, Sergei P. Khabarov², e-mail: serg.habarov@mail.ru,
Andrei G. Shpectorov³, e-mail: agshpectorov@etu.ru

¹Sitronics KT JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation ²St. Petersburg state forest technical university, Russian Federation ³St. Petersburg electrotechnical university "LETI", St. Petersburg, Russian Federation

Abstract A route calculation problem for unmanned vessels is investigated according to the control position and course high requirements. Present day electronic chart display and information systems (ECDIS) operating on the track control regime provide wheel-of-point calculation to course changing. It is not enough to control unmanned ship on the route in the autonomous mode. To increase control precision a new route calculation routine is suggested. The routine provides route calculation in the geodesic coordinates without Cartesian reference system mapping. It is shown that in the empty water the routine can be reduced to an inverse survey computation. A universal route calculation algorithm providing great circle arc segmentation with any given accuracy is suggested. In the case of course changing restricted area, it is needed to calculate an alternate route for obstacle or collision avoidance. The algorithm of alternate route calculation based on Dubins problem solution is applied. The route is found as a sequence of great circle arcs according to the ship turn radius. The shown algorithm allows finding avoidance route waypoints with any given resolution.

Key words. unmanned navigation, track control, orthodromic line, route planning, guidance, waypoints, spheroid geodesy, Dubins system

Введение

В последние годы стало бурно развиваться безэкипажное судовождение [1]. В настоящее время в России проводятся опытно-конструкторские работы по разработке базовой технологической платформы безэкипажного судовождения коммерческого флота. В рамках данных работ разработана и проходит испытания технологическая платформа, которая позволяет дооборудовать действующие гражданские суда и обеспечить их безэкипажное судовождение [2-4]. Совместно с проработкой технической платформы разработаны требования РМРС к автономным и дистанционно управляемым надводным судам «Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)» [5]. С учетом автономности более жесткие требования предъявляются к формированию маршрута судна и контролю положения судна относительно заданного маршрута.

На судах с экипажем в настоящее время задача формирования маршрута преимущественно возложена на электронно-картографические навигационно-информационные системы (ЭКНИС). Оператор ЭКНИС осуществляет предварительную прокладку маршрута путем задания последовательности путевых точек. С учетом определенных ограничений (геометрических и динамических) оператор может изменять маршрут во время движения судна. ЭКНИС рассчитывает вспомогательные точки для маневров и заблаговременно предупреждает оператора о приближении к ним. Как правило, расчетная задача сводится к определению точки поворота и времени ее достижения.

Для безэкипажных судов задачи ЭКНИС должна выполнять автономная навигационная система (АНС) [4]. Заданная траектория движения судна формируется оператором перед выходом в рейс или отправляется с берегового поста в АНС, расположенную на судне, во время движения судна

по маршруту. С учетом дополнительных требований по контролю маршрута движения АНС должна осуществлять более детальный расчет путевых и промежуточных точек. К тому же, количество и периодичность перерасчета должна изменяться в зависимости от условий плавания, скорости хода судна, и т. д. Поэтому является актуальной разработка алгоритма расчета точек маршрута на произвольной последовательности заданных путевых точек с настраиваемой степенью детализации маршрута.

1. Уточнение требований к алгоритму расчета траектории

Для начала движения безэкипажного судна в автоматическом режиме АНС получает команду в виде заданной траектории движения и времени, в течение которого необходимо выполнить маневрирование. Траектория задается упорядоченной совокупностью путевых точек $\{P_i, i = 1, \dots, n\}$, которые заданы географическими координатами: широтой φ_i и долготой λ_i . При этом программная траектория движения судна интерпретируется, как совокупность фрагментов F_i прямолинейных участков (либо дуг большого круга), соединяющих между собой точки и может быть представлена в виде:

$$T = \{F_1(P_1, P_2), F_2(P_2, P_3), \dots, F_{n-1}(P_{n-1}, P_n)\} \quad (1)$$

Следует отметить, что требование по времени маневрирования обуславливает наличие требований к скорости хода судна на участках траектории. Поэтому формально каждый фрагмент F_i должен также включать скорость хода. Однако можно рассмотреть упрощенный вариант траекторной задачи, в котором скорость хода учитывается косвенно, путем ввода ограничений на радиус циркуляции, так как скорость хода существенно влияет на динамику движения судна в горизонтальной плоскости. При наличии такого алгоритма расчета скорость можно определить при помощи итерационной процедуры, с последовательным уточнением траектории при заданных скоростях. Подобным образом можно учесть и действие внешних возмущений на судно, при наличии информации об обстановке в районе плавания.

Представляется очевидным, что для контроля движения безэкипажного судна недостаточно определение координат точек на фрагментах F_i необходимо также знание значений путевого угла в промежуточных точках траектории. На прямолинейных участках определение путевого угла не представляет сложности, на ортодромиях – геодезическая задача также известна. Расчет путевого угла в промежуточных точках на переходах с галса на галс в стандартных картографических системах не производится, однако он должен быть реализован в АНС безэкипажного судна.

Переход с галса на галс осуществляется по криволинейной траектории, близкой к дуге окружности, определяемой радиусом циркуляции судна. Следовательно, требуется получить на

основе последовательности (1) следующий набор участков траектории:

$$T' = \left\{ F'_1, S_1(P_{1p}, r_{12}, P_{2q}), F'_2, S_2(P_{2p}, r_{23}, P_{3q}), \dots, \right. \\ \left. F'_{n-2}, S_{n-2}(P_{n-2,p}, r_{n-2,n-1}, P_{n-1,q}), F'_{n-1} \right\} \quad (2)$$

где S_i – криволинейный сегмент; $P_{ip}, P_{iq} \in F_i$ – соответственно точки начала и конца криволинейного сегмента, принадлежащие фрагменту F_i ; r_{ij} – радиус поворота на переходе от фрагмента F_i к F_j ; $F'_i \in F_i$ – усеченный фрагмент траектории от точки P_{ip} до P_{iq} (за исключением первого и последнего фрагментов, определяемых, соответственно, точками начала и конца маршрута). Для достижения требуемой детализации маршрута для каждого из участков траектории S_i, F'_i должно быть задано количество точек N_i , и для каждой точки, включая P_{ip} и P_{iq} , следует определять широту, долготу и курсовой угол.

Таким образом, исходными данными для расчета набора (2) являются заданная траектория (1), совокупность радиусов циркуляции $\{r_{ij}\}$ для каждого криволинейного сегмента, совокупность чисел точек для участков S_i, F'_i . В общем случае задача должна быть решена на сфере: фрагменты F_i, F'_i могут быть ортодромиями. Однако целесообразно ввести ограничения в виде запрещенных зон плавания: расчетные точки траектории не должны попадать в запрещенные области. Для этого следует предусмотреть возможность перехода на новый галс по внешнему радиусу. Соответственно, для каждого сегмента также должно быть определено или задано направление поворота.

2. Реализация алгоритма расчета криволинейных сегментов траектории

Как отмечалось выше, задача расчета промежуточных точек на ортодромиях F_i, F'_i является известной, и в данной статье не рассматривается. Основное внимание уделяется расчету точек на криволинейных сегментах. Пример такого сегмента приведен на рисунке 1. Исходная траектория движения задана точками a, b, c . Для перехода на галс к точке c по дуге заданного радиуса r требуется сначала найти координаты и курсовые углы в крайних точках криволинейного сегмента p, q , затем – в N точках, равномерно распределенных по сегменту.

Для решения задачи можно воспользоваться соотношениями сферической геодезии [6], связывающими координаты точек дуги большого круга, курсовые углы в данных точках и центральный угол, образованный дугой. Для этого необходимо рассчитать элементы сферических прямоугольных треугольников pOb и bOq . Тогда, при известных центральных углах σ_{bp} и σ_{bq} можно определить координаты крайних точек сегмента. Для вычисления

координат промежуточных точек потребуется вычисление координат точки O .

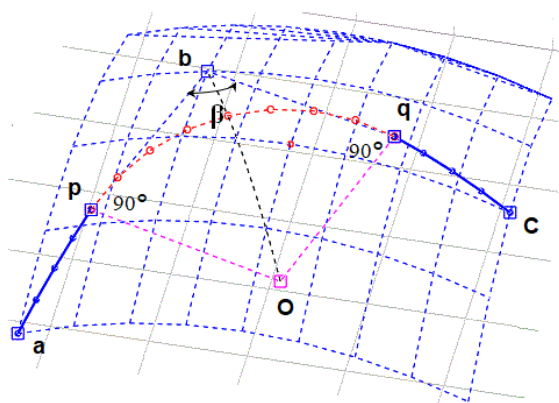


Рис. 1. Расчетные элементы криволинейного сегмента

Алгоритм расчета крайних точек сегмента включает следующие этапы:

1) определение центральных углов σ_{ab} , σ_{bc} и σ_{ac} сферического треугольника abc по географическим координатам точек a , b , c – обратная геодезическая задача [7];

2) определение курсовых углов K_{ab}^b , K_{bc}^b – также в рамках решения обратной геодезической задачи. Поскольку для ортодромии курсовые углы в начале и конце дуги большого круга отличаются, то верхний индекс указывает, в какой точке определяется искомый курсовой угол;

3) вычисление угла β между фрагментами траектории \vec{ab} и \vec{bc} :

$$\beta = \arccos \left(\frac{\cos(\sigma_{ac}) - \cos(\sigma_{bc})\cos(\sigma_{ab})}{\sin(\sigma_{bc})\sin(\sigma_{ab})} \right) \quad (3)$$

4) определение центральных углов прямоугольных сферических треугольников pOb и bOq :

$$\sigma_{bp} = \sigma_{bq} = \arcsin(\operatorname{tg}(r/R_z) \operatorname{ctg}(\beta/2)) \quad (4)$$

$$\sigma_{bO} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}(\sigma_{bp})}{\cos(\beta/2)} \right) \quad (5)$$

где R_z – радиус Земли. Для упрощенных вычислений допустимо использовать значение среднего радиуса, для повышения точности – вычислять радиус по широтам точек a , b , c , и выполнять локальное осреднение;

5) определение курсовых углов K_{bp}^b , K_{bO}^b , K_{bq}^b :

$$\begin{aligned} K_{bp}^b &= K_{ab}^b + 180; \\ K_{bO}^b &= K_{bc}^b \pm (\beta/2); \\ K_{bq}^b &= K_{bc}^b, \end{aligned} \quad (6)$$

где для поворота на правый борт углы суммируются, а для поворота на левый борт – вычитаются;

6) вычисление координат точки p и курсового угла K_{bp}^p по известным координатам точки b (φ_b, λ_b), курсовому углу K_{bp}^b и центральному углу σ_{bp} :

$$\begin{aligned} \varphi_p &= \operatorname{angle}(\sigma_0 + \sigma_{bp}, \alpha_0); \\ \lambda_p &= \lambda_b - \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\alpha_0)\sin(\sigma_0)}{\cos(\sigma_0)} \right) + \\ &+ \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\alpha_0)\sin(\sigma_0 + \sigma_{bp})}{\cos(\sigma_0 + \sigma_{bp})} \right) \\ K_{pb}^p &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha_0)}{\cos(\sigma_0 + \sigma_{bp})} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \operatorname{angle}(\alpha, \beta) &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\alpha)\cos(\beta)}{(\cos^2(\alpha) + \sin^2(\alpha)\sin^2(\beta))^{1/2}} \right); \\ \alpha_0 &= \operatorname{angle}(K_{pb}^p, \varphi_b); \\ \sigma_0 &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}(\varphi_b)}{\cos(K_{pb}^p)} \right). \end{aligned}$$

7) вычисление аналогично п. 6) координат и курсовых углов для точек q , O ;

8) для крайней точки сегмента q определяется курсовой угол на точку c :

$$K_{qc}^q = K_{qb}^q + 180. \quad (8)$$

С помощью формул (7) легко вычислить и промежуточные точки криволинейного сегмента. По известным значениям курсового угла в начале и в конце сегмента, а также заданному количеству промежуточных точек (на рисунке 1 выбранное число точек $N = 7$) вычисляется приращение курсового угла ΔK :

$$\Delta K = \frac{K_{qc}^q - K_{pb}^p}{N + 1}. \quad (9)$$

Затем итерационно вычисляется курсовой угол в каждой из промежуточных точек. С учетом того, что координаты точки O известны, а центральные углы для всех промежуточных точек равны $\sigma_{op} = \sigma_{oq}$, по формулам (7) определяются широта и долгота промежуточных точек.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 приведен пример тестовой траектории, заданной географическими координатами точек на испытаниях движения безкипажного судна по маршруту. Результаты работы алгоритма показаны на рисунке 3.

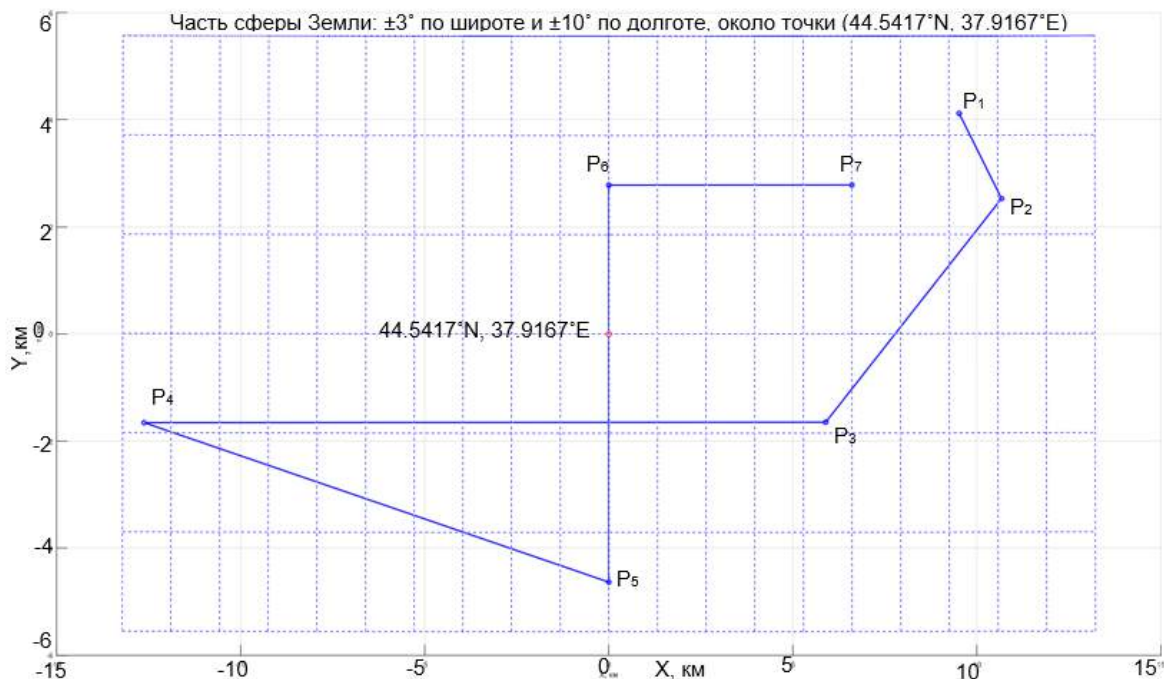


Рис. 2. Пример заданной траектории движения судна

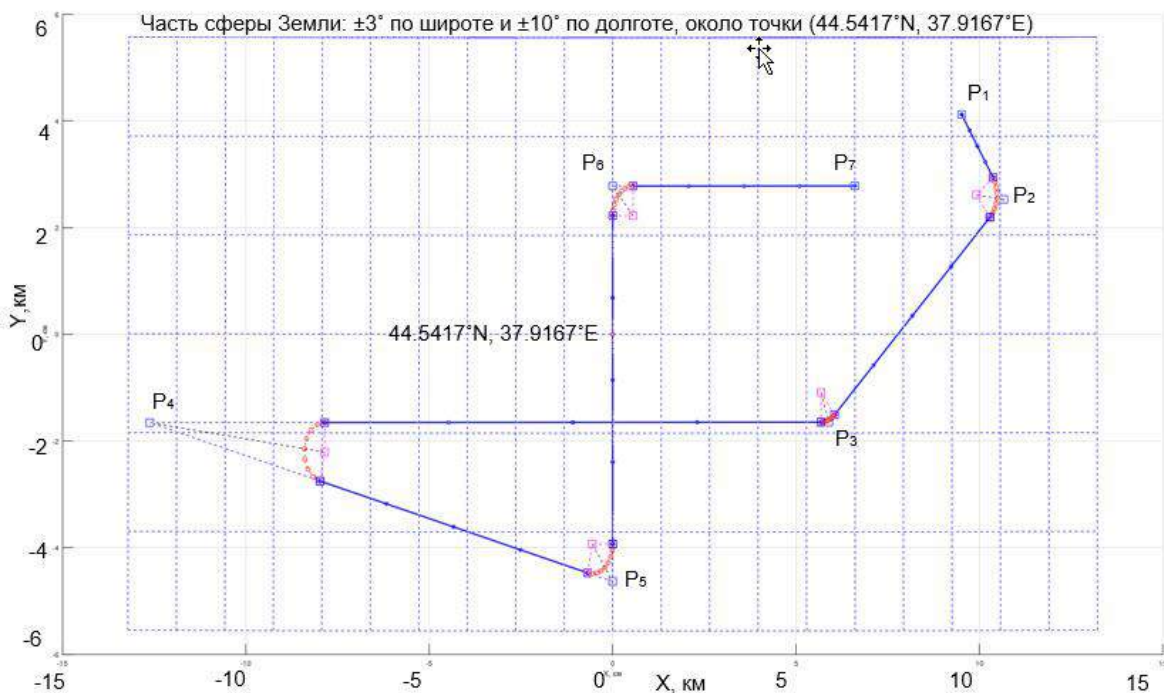


Рис. 3. Расчетная траектория движения судна

2. Алгоритм формирования траектории обхода запрещенной зоны маневрирования

После расчета промежуточных точек уточненной траектории АНС должна осуществить проверку каждого сегмента на допустимость движения. В случае наличия ограничений на каком-либо сегменте, требуется осуществлять пересчет и выбор допустимой траектории.

Одним из вариантов является изменение скорости хода, вследствие чего изменяется радиус

поворота судна. При расчете новой траектории используется, очевидно, описанный выше алгоритм. Однако уменьшение скорости хода, зачастую связанное с изменением режима работы главной энергетической установки, нежелательно, к тому же, возникают дополнительные потери во времени рейса.

Другой вариант предполагает расчет новой траектории в рамках заданной скорости и радиуса поворота, однако траектория теперь проходит по внешнему радиусу. Для решения задачи расчета

промежуточных точек такой траектории движения можно рассматривать безэкипажное судно как «машину Дубинса» [8].

Классическая задача для «машин Дубинса» [9] предполагает поиск оптимального управления, позволяющего перевести объект из текущего положения и направления в заданное положение и направление по кратчайшему пути при наличии ограничений на радиус поворота. Можно показать, что оптимальная траектория, приводящая объект в исходную точку с новым направлением, представляет совокупность трех последовательных криволинейных сегментов, отличающихся направлением поворота [10], как показано на рисунке 4. Для примера в качестве искомой точки выбрана путевая точка маршрута Р4.

Одна из реализаций алгоритма, позволяющего построить такую траекторию движения предполагает следующие этапы:

1) вычисление курсовых углов K_{ba}^b, K_{bc}^b по координатам путевых точек a, b, c ;

2) определение курсовых углов на центры окружности начального и конечного сегмента:

$$\begin{aligned} K_{bO_1}^b &= K_{ba}^b \pm 90; \\ K_{bO_3}^b &= K_{bc}^b \pm 90, \end{aligned} \quad (10)$$

где направление сдвига зависит от взаимной ориентации путевых точек;

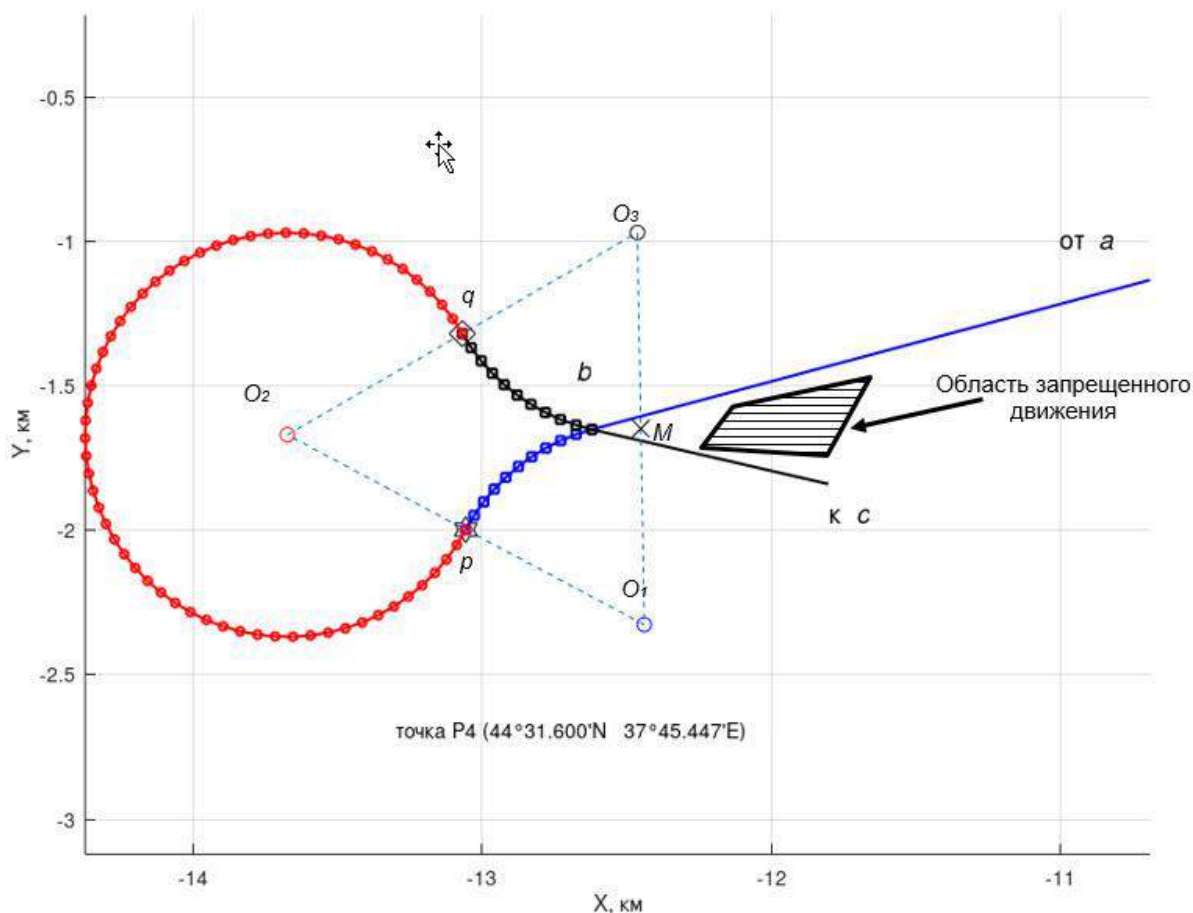


Рис 4. Формирование траектории для системы типа «машина Дубинса»

3) определение географических координат центра окружности начального сегмента O_1 по координатам точки b , курсовому углу $K_{bO_1}^b$ и центральному углу $\sigma_{bO_1} = r/R_z$ в соответствии с формулами (7). Аналогично определяются координаты точки O_3 ;

4) вычисление центрального угла $\sigma_{O_1O_3}$ и курсового угла $K_{O_1O_3}^{O_1}$ по координатам точек O_1, O_3 ;

5) определение координат точки M по формулам (7), где центральный угол $\sigma_{O_1M} = \sigma_{O_1O_3} / 2$;

6) определение курсового угла $K_{MO_2}^M$ и центрального угла σ_{MO_2} :

$$\begin{aligned} K_{MO_2}^M &= K_{O_1O_2}^{O_1} \pm 90; \\ \sigma_{MO_2} &= \arccos \left(\frac{\cos(2r/R_z)}{\cos(\sigma_{O_1M})} \right); \end{aligned} \quad (11)$$

7) определение географических координат центра окружности O_2 в соответствии с формулами

(7) (по координатам точки M , курсовому углу $K_{MO_2}^M$ и центральному углу σ_{MO_2});

8) вычисление курсовых углов $K_{O_1O_2}^{O_1} = K_{O_1p}^{O_1}$, $K_{O_3O_2}^{O_3} = K_{O_3q}^{O_3}$ по координатам точек O_1, O_2, O_3 ;

9) определение координат точек p и q , соответствующим началу и окончанию второго

сегмента по формулам (7), где центральные углы равны r/R_Z .

Таким образом, вычисляются координаты и курсовые углы для всех точек, определяющих сегменты движения по внешнему радиусу. Порядок расчета промежуточных точек аналогичен расчету при повороте по внутреннему радиусу, количество промежуточных точек целесообразно выбирать исходя из разности курсовых углов. Окончательная расчетная траектория движения судна представлена на рисунке 5.

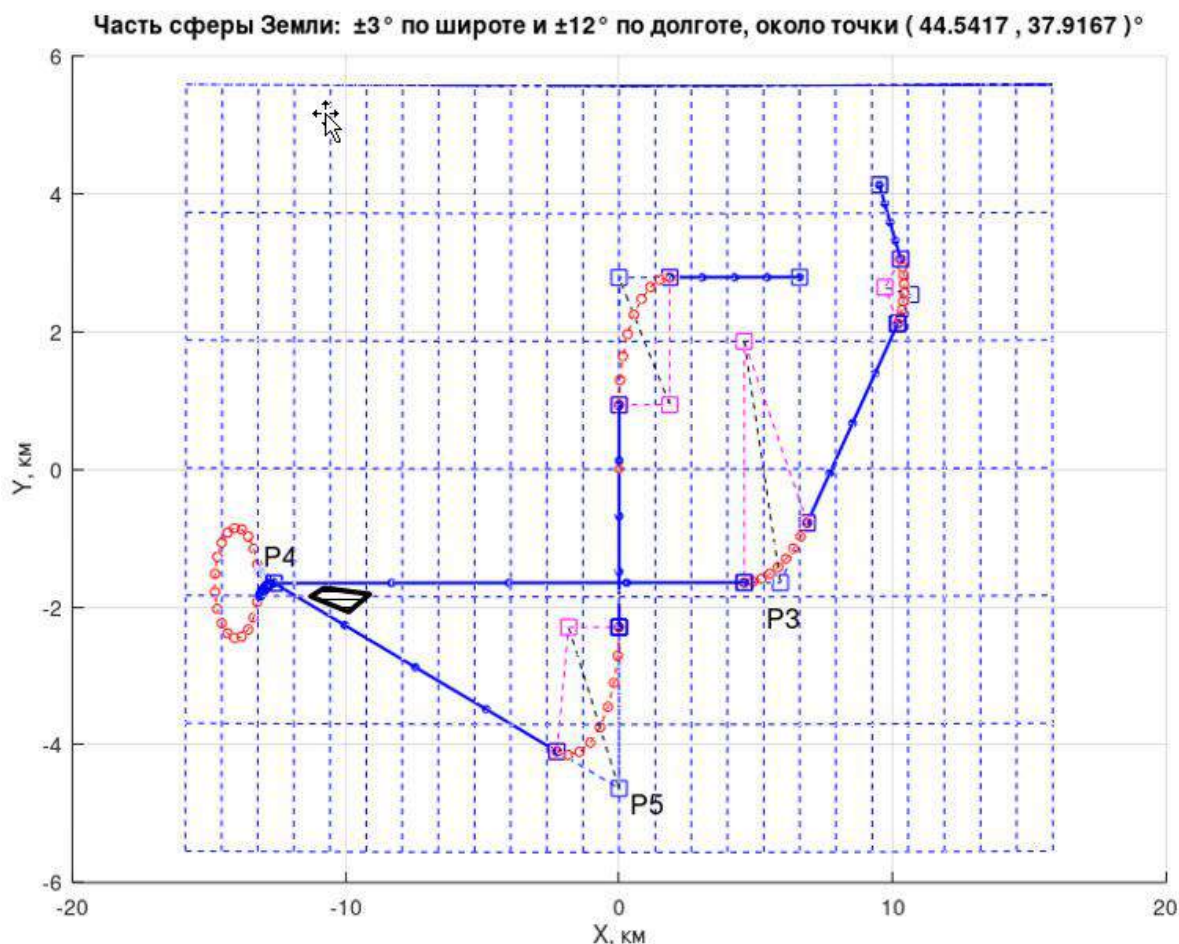


Рис. 5. Имитация отображения траектории движения судна на сферической поверхности

Заключение

Развитие безэкипажного судовождения ставит новые задачи перед системами управления движением судов. Автономные навигационные системы для безэкипажных судов во многих аспектах заменяют классические электронно-картографические навигационно-информационные системы, однако повышенные требования к контролю курса и положения судна обуславливают необходимость разработки новых методов и алгоритмов планирования маршрута.

В результате работы предложен универсальный алгоритм расчета криволинейных сегментов траектории движения судна на сферической поверхности. Алгоритм позволяет получить расчетные точки траектории с любой степенью детализации, что особенно актуально для

безэкипажных судов, для которых требуется постоянный контроль движения на маршруте. При этом фрагменты траектории представляют собой дуги линий большого круга, что обеспечивает минимизацию длины пути. В каждой точке маршрута также рассчитывается требуемый курсовой угол, что позволяет своевременно отслеживать и прогнозировать отклонение судна от заданного маршрута. Работа алгоритма была проверена в ходе натурных испытаний грузового судна в автономном режиме [2, 3].

В качестве дополнения к алгоритму разработан способ расчета траектории обхода запрещенной для маневрирования зоны на основе решения задачи Дубинса. Данный расчет применим для обходов препятствий или расхождения с другими судами. В данной работе рассматривается движение на тихой воде, однако при наличии информации о внешних

возмущениях (течение, ветер), на базе предложенного алгоритма легко осуществить коррекцию планирования маршрута.

Можно отметить, что данный алгоритм позволяет моделировать разные сценарии движения судна, на основе которых можно выбирать более безопасные или менее продолжительные маршруты.

Литература

1. Б. С. Ривкин. Беспилотные суда. Навигация и не только, Гироскопия и Навигация, 2021, Т. 29, №1. С. 111-132.
2. <http://morflot.gov.ru/novosti/lenta/n5129.html> (Дата обращения 25.03.2021 г.).
3. <https://www.rosmorport.ru/news/company/37249/> (Дата обращения 25.03.2021 г.).
4. Система координированного управления движением судна в режимах автоматического и дистанционного управления // Патент России № 2741669. 2021. Бюл. №4. /Корнев А.С., Шпекторов А.Г., Хабаров С.П. [и др.].
5. НД № 2-030101-037. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). СПб., Российский морской регистр судоходства. <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules&d=930A4DAB-1AD1-4120-8D80-633FC6898FDD> (Дата обращения 25.03.2021 г.).
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Great-circle_navigation (Дата обращения 08.04.2021 г.).
7. Поклад Г.Г. Геодезия: учебное пособие для вузов / Г.Г. Поклад, С.П. Гриднев. – М.: Академический Проект, 2007.-592 с.
8. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Формирование программных траекторий движения БПЛА с учетом ограничений на их управляемость. В сборнике: Цифровые технологии в лесном секторе. Материалы II Всероссийской научно-технической конференции-вебинара. Санкт-Петербург, 2021. С. 141-143.
9. L.E. Dubins. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents. American Journal of Mathematics, 79: 497-516. 1957.
10. Вагизов М. Р., Хабаров С. П. Построение программных траекторий движения на базе решения задачи «Машина Дубинса», Информация и космос, 2021, №3. С. 117-125.

References

1. B. S. Rivkin. Bepilotnye suda. Navigatsiya i ne tol'ko [Unmanned Ships: Navigation and More], Giroskopiya i Navigatsiya, 2021, T. 29, №1. S. 111-132
2. <http://morflot.gov.ru/novosti/lenta/n5129.html> (Data obrashcheniya 25.09.2021)
3. <https://www.rosmorport.ru/news/company/37249/> (Data obrashcheniya 25.09.2021 г.)
4. Sistema koordinirovannogo upravleniya dvizheniem sudna v rezhimakh avtomaticheskogo i distantsionnogo upravleniya [Ship motion coordinated control system operating on automatic and remotated regimes] // Patent Rossii № 2741669. 2021. Byul. №4. /Korenev A.S., Shpektorov A.G., Khabarov S.P. [i dr.].
5. ND № 2-030101-037. Polozheniya po klassifikatsii morskikh avtonomnykh i distantsionno upravlyaemykh nadvodnykh sudov (MANS) [Regulations for classification of maritime autonomous and remotely controlled surface ships (MASS)]. SPb., Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules&d=0B23D5BC-BC75-4CCE-B3C6-FB5006D88E2E> (Data obrashcheniya 27.09.2021)
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Great-circle_navigation (Data obrashcheniya 08.04.2021 г.)
7. Poklad G.G. Geodeziya: uchebnoe posobie dlya vuzov [Geodesy: manual for graduate students] / G.G. Poklad, S.P. Gridnev. – M.: Akademicheskij Proekt, 2007.-592 s.
8. Khabarov S.P., Shilkina M.L. Formirovanie programmnykh traektoriy dvizheniya BPLA s uchetom ogranicheniy na ikh upravlyaemost' [The program trajectories design for controllability-constrained unmanned aerial vehicles motion]. V sbornike: Tsifrovye tekhnologii v lesnom sektore. Materialy II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii-vebinara. Sankt-Peterburg, 2021. S. 141-143.
9. L.E. Dubins. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents. American Journal of Mathematics, 79: 497-516. 1957.
10. Vagizov M. R., Khabarov S. P. Postroenie programmnykh traektoriy dvizheniya na baze resheniya zadachi «Mashina Dubinsa» [The program trajectories formation based on Dubins path problem solution], Informatsiya i kosmos, 2021, №3. S. 117-125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Сергеевич Корнев, начальник отдела разработки систем автоматического управления движением, АО «Ситроникс КТ», 199178, Санкт-Петербург, Малый проспект В. О., 54 корп. 4, лит. П e-mail alexey.korenev@sitronics-kt.ru

Alexei S. Korenev, head of department of automatic control system design, Sitronics KT JSC, Malyy Prospekt V.O., 54, building 5, Saint-Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail alexey.korenev@sitronics-kt.ru

Сергей Петрович Хабаров, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный лесной технический университет, 194021, Санкт-Петербург, Институтский переулок д.5, e-mail serg.habarov@mail.ru

Андрей Григорьевич Шпекторов, кандидат технических наук, доцент кафедры корабельных систем управления, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, e-mail agshpectorov@etu.ru

Sergei P. Khabarov, Senior lecturer, Ph.D. in Engineering Science, senior lecturer of the Department of information systems and technologies, Saint-Petersburg State Forest Technical University, 5 Institutskii per., St.Petersburg, 194021, Russian Federation, e-mail serg.habarov@mail.ru

Andrei G. Shpectorov, Senior lecturer, Ph.D. in Engineering Science, Senior lecturer of the Department of marine control systems, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail agshpectorov@etu.ru

Поступила в редакцию: 15.09 2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 004.855; 62.506.222.001.57; 681.3(075.8)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.048>

Разработка структурной схемы когнитивной транспортной системы

С.А. Селиверстов¹, e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru, Я.А. Селиверстов¹, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru,
А.Г. Котенко¹, e-mail: algenko@gmail.com, О.Ю. Лукомская¹, e-mail: luol@mail.ru,
Н.В. Шаталова¹, e-mail: shatillen@mail.ru, О.В. Бородина¹, e-mail: borodinaov@gmail.com

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Развитие технологий проектирования интеллектуальных систем, использующих алгоритмы схожие с мыслительной обработкой мозга, стимулируют поиски новых подходов для создания искусственного интеллекта человеческого уровня. Для выполнения столь сложных задач используются когнитивные архитектуры, представляя собой следующий уровень развития разнородных процессов интеллектуализации. В данной статье под практической призмой интеллектуализации транспортных систем исследуется процесс развития современных когнитивных архитектур. Предметом исследования является разработка структурной схемы когнитивной транспортной системы. Для выполнения этой задачи исследуются новые парадигмы когнитивного управления, расширяющие подходы к вычислительному интеллекту. Уточняется понятие когнитивной архитектуры. Исследуются современные работы в области каталогизации когнитивных архитектур. Выявляются критерии оценки когнитивных архитектур. Подробно рассматриваются и анализируются когнитивные архитектуры 4D / RCS, ALLIANCE, LIDA, используемые в современных системах управления беспилотным транспортом и роботами. Выявляются положительные обобщенные факторы, направленные на эффективность когнитивной архитектуры. Разрабатывается структурная схема когнитивной транспортной системы, основные подсистемы которой включают когнитивное управление транспортом, когнитивные транспортные коммуникации, когнитивные транспортные средства. Описывается структура слоев. Отмечаются преимущества, в том числе бийнспирированность, модульность, объектно-ориентированность, параллелизм, возможность использования интеллектуальных методов обучения.

Ключевые слова: транспорт, транспортная система, когнитивная архитектура, искусственный интеллект, структурная схема

Development of a structural diagram of a cognitive transport system

Svyatoslav A. Seliverstov¹, e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru,
Yaroslav A. Seliverstov¹, e-mail: seliverstov-yr@mail.ru, Aleksey G. Kotenko¹, e-mail: algenko@gmail.com,
Ol'ga Yu. Lukomskaya¹, e-mail: luol@mail.ru, Natalya V. Shatalova¹, e-mail: shatillen@mail.ru,
Olga V. Borodina¹, e-mail: borodinaov@gmail.com

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The development of technologies for the design of intelligent systems using algorithms similar to mental processing of the brain stimulates the search for new approaches to create artificial intelligence at the human level. To perform such complex tasks, cognitive architectures are used, representing the next level of development of heterogeneous intellectualization processes. In this article, under the practical prism of intellectualization of transport systems, the process of development of modern cognitive architectures is investigated. The subject of the research is the development of a structural diagram of the cognitive transport system. To accomplish this task, new paradigms of cognitive control are being investigated, expanding approaches to computational intelligence. The concept of cognitive architecture is clarified. Examines current work in the field of cataloging cognitive architectures. Criteria for assessing cognitive architectures are identified. Cognitive architectures 4D / RCS, ALLIANCE, LIDA, used in modern control systems for unmanned vehicles and robots, are considered and analyzed in detail. We identify positive generalized factors aimed at the effectiveness of cognitive architecture. A structural diagram of the cognitive transport system is being developed, the main subsystems of which include cognitive transport control, cognitive transport communications, and cognitive vehicles. The structure of the layers is described. The advantages are noted, including bioninspiration, modularity, object-orientation, parallelism, the possibility of using intelligent teaching methods.

Keywords: transport, transport system, cognitive architecture, artificial Intelligence, structural scheme.

Введение

Биоинспирированная эволюция интеллектуальных (транспортных) систем в направлении когнитивности открывает новые пространства информационного функционала, позволяющие произвести ускоренную надстройку продвинутого искусственного интеллекта, оформить контур реляционного взаимодействия «умных» систем и подсистем и отладить процесс непрерывного самообучения когнитивного интеллекта на каждом уровне архитектуры системной иерархии [1].

Объектом исследования является процесс развития и интеллектуализации транспортной системы.

Предметом исследования является разработка структурной схемы когнитивной транспортной системы.

Актуальность разрабатываемой темы подтверждается и отмечается с приоритетом в следующих государственных программах развития:

1. Транспортная стратегия РФ до 2030 года.
2. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта.
3. Концепция развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года.

4. Федеральный проект «Искусственный интеллект».

5. Национальный проект «Цифровая экономика Российской Федерации».

6. Перечень технологий, применяемых в рамках экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций.

Согласно [1] когнитивная транспортная система – это наделенная искусственным когнитивным интеллектом организованная совокупность самовзаимодействующих и функционирующих в окружающей среде элементов, определяемых как: когнитивные транспортная инфраструктура, транспортные средства, транспортные коммуникации, регламентируемая и информационная среда, участвующих в процессе перераспределения ресурсной среды и человеческих ресурсов с целью удовлетворения и предвосхищения потребностей человека и общества в передвижение и перемещение при соблюдении принципов устойчивого развития, доступности, безопасности и нулевой смертности. Формально графическую интерпретацию данного определения можно представить на (рис. 1.).

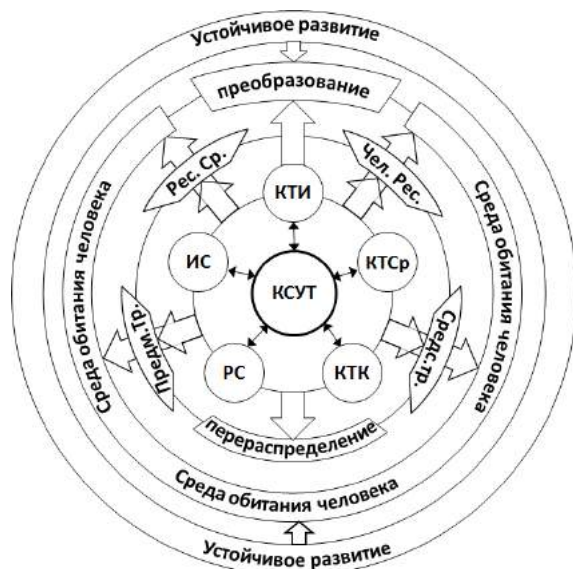


Рис. 1. Графическая интерпретация понятия когнитивная транспортная система

где: КСУТ – когнитивная система управления транспортом; КТИ - когнитивная транспортная инфраструктура, КТСр - когнитивные транспортные средства, КТК - когнитивные транспортные коммуникации, РС - ресурсная среда, ИС - информационная среда.

Основным аспектом развития когнитивной транспортной системы являются не только системы сбора, накопления и обработки данных (системы транспортного и транспортно-логистического мониторинга, детекторы, мобильные приложения и другие), а также интеллектуальные системы анализа и обучения, базы знаний, но и системы семантической оптимальной фильтрации с использованием процессов искусственного мышления и слияния/генерации новой информации.

Развиваемые, согласно [2] новые парадигмы когнитивного управления, расширяющие подходы к вычислительному интеллекту основанные на

семантической оценке и извлечении смысла анализируемых разнородных данных могут выполняться в разных областях и показывают универсальность. Последние используют целостные когнитивные подходы и ориентированы на разработку самого агента, и на то, как он преобразует данные для получения информации, управления и использования знаний, посредством опыта и взаимодействия его с средой [3]. Когнитивные подходы стремятся учитывать сложные функциональные и структурные критерии с целью получения более реалистичных решений, сравнимых с решениями, который принимает мозг на основе человеческого опыта. Получение таких решений требует наличия в когнитивной системе определенного функционального слоя, обеспечивающего процессы развития модельного поведения агента, имитирующего естественное поведение человека, что, в свою очередь, позволяет предоставлять синтетическим агентам возможности многоуровневого рассуждения.

Достижение этого естественного поведения подразумевает развитие машинных человекоподобных когнитивных функций в когнитивной архитектуре, таких как зрение, слух, память, внимание, планирование и принятие решений.

1. Постановка задачи исследований и анализ предметной области

Настоящее научное исследование является продолжением работы проводимой в рамках общей темы НИР «Разработка основ теории управления когнитивными транспортными системами». Основная цель заключается в разработке структурной схемы когнитивной транспортной системы, эффективная организация которой может стать отправной точкой опережающего развития цифрового перехода от интеллектуальной транспортной системы к когнитивной.

В первые годы развития когнитивных архитектур, начиная например, с работы Ньюэлл А. [4] делалась попытка систематически и ясно изложить природу интеллектуального поведения и рациональных действий. Ньюэлл А. исследует проблему разума и разложение ее на ограничения, отмечая, что наиболее фундаментальным вкладом искусственного интеллекта и информатики в совместное «здание» когнитивной науки было понятие физической системы символов, т.е. концепции широкого класса систем, способных иметь и манипулировать символами.

На (рис. 2) схематически представлена примерная система символов, предложенная А. Ньюэллом в работе [4].

По Ньюэллу SS(Symbol System) – это система символов, машина, которая существует в среде, состоящей из объектов, распределенных в пространстве локаций. SS состоит из памяти, набора операторов, элемента управления, входа и выхода. Её входы - это объекты в определенных местах; выходы - это модификация или создание объектов в определенных (обычно разных) местах; внешнее поведение состоит из выходных данных, которые машина производит в зависимости от её входов. Более крупная система среды плюс SS образует

замкнутую систему, поскольку объекты вывода либо становятся объектами ввода, либо влияют на них.

Внутреннее состояние SS состоит из состояния памяти и состояния управления; а её внутреннее поведение состоит из изменения этого внутреннего состояния с течением времени.

SS: EXAMPLE SYMBOL SYSTEM

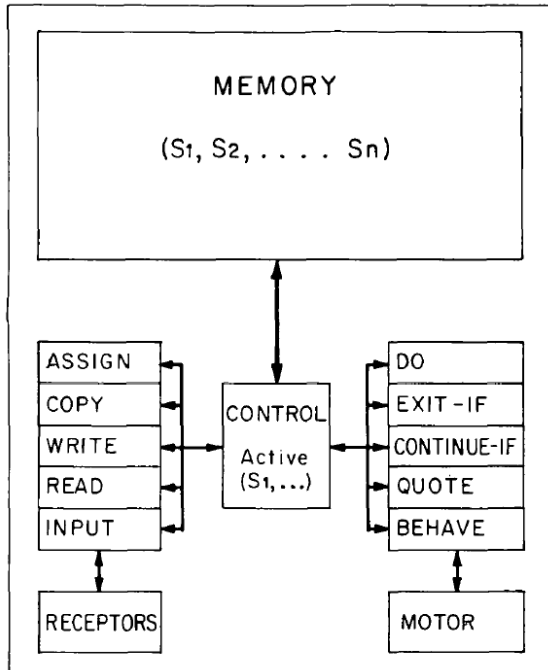


Рис.2. Структура SS, парадигматической системы символов (из работы [4])

Поведение, возникающее при объединении оператора и его входных данных, называется операцией. Также в этой и последующей работе А. Ньюэллом были предложены критерии, которым должна удовлетворять когнитивная архитектура человека. Критерии Ньюэлла включают: гибкое поведение, операции в реальном времени, рациональность, обширную базу знаний, динамическое поведение, интеграцию знаний, обучение, развитие, языковые способности, самосознание и реализацию мозга [5]. Эти критерии в последствие были актуализированы в работах [6].

Формализация процессов моделирования человеческого разума порождает раздел когнитивной науки – когнитивные архитектуры.

Сегодня в большинстве научных работ [6,7] когнитивные архитектуры определяются как план для интеллекта, или, более конкретно, предложение о ментальных представлениях и вычислительных процедурах, которые работают с этими представлениями, обеспечивая ряд интеллектуальных моделей поведения. Стремительный рост появления когнитивных архитектур от дизайна когнитивной робототехники до моделирования инвариантных механизмов человеческого познания вызвал необходимость их каталогизации, последнее было проведено А.В. Самсоновичем в [8].

За последние полвека теоретические и практические исследования в области когнитивных архитектур неуклонно расширяются [6]. Kotseruba, I.&

Tsotsos, J.K. в своем обзоре визуализируют список из 195 когнитивных архитектур (рис.3)

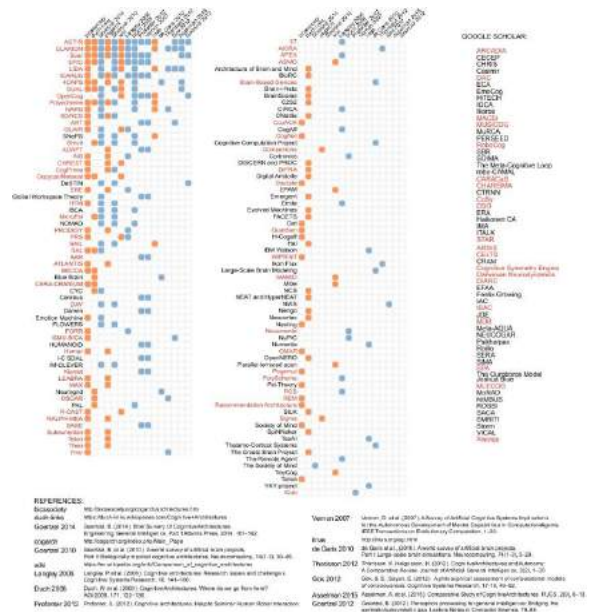


Рис.3. Список когнитивных архитектур (из работы [6])

Представленный список показывает когнитивные архитектуры, упомянутые в обзорах, опубликованных за последние 10 лет на момент их исследования.

Для наглядности представим хронологию 84 когнитивных архитектур, (рис. 4), согласно [6].

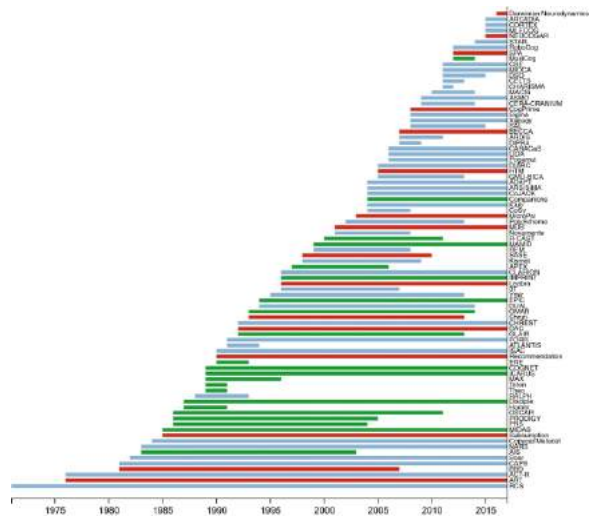


Рис. 4. Хронология когнитивных архитектур, (из работы [6])

На представленной визуализации (рис.4) согласно [6], каждая строка соответствует одной архитектуре, отсортированной по дате начала, так что самые ранние архитектуры показаны внизу рисунка. Цвета линий соответствуют разным типам архитектур: символической (зеленый), эмерджентной (красный) и гибридной (синий) [6]. Согласно этим данным, особый интерес к символическим архитектурам проявлялся с середины 1980-х до начала 1990-х годов, однако после 2000-х годов большинство вновь разработанных архитектур являются гибридными [6].

В чуть в более поздней работе [9] авторов Toshev, A. & Talanov, M. акцент делается на два класса моделей: биоинспирированные и символические. 1-й класс связывается с представлением биоинспирированных моделей интеллекта; второй класс представляет модели, которые, по мнению авторов, реализуют только функции, но не способ их реализации. Работа Toshev, A. & Talanov, M. включает анализ 27 наиболее распространенных когнитивных архитектур, для выявления наиболее подходящих аффективных вычислений и «чувственных» вычислений. Оценка которых выполняется на основе критериев [9] таких как:

- эмоциональные;
- уровни мышления;
- компоненты искусственного интеллекта.

Результаты исследования [9] авторы представляют таблицей, которая включает – номер, имя когнитивной архитектуры и суммарную оценку по критериям, (табл. 1).

Таблица 1.

Список когнитивных архитектур, оцениваемых по эмоциональной реализации, (согласно [9])

№	Когнитивная архитектура	Оценка
1	4CAPS	4
2	ACT-R	3
3	ALifeE	3
4	Apex	4
5	ASMO	8
6	CHREST	5
7	CLARION	6
8	CopyCat	4
9	DUAL	6
10	EPIC	3
11	FORR	2
12	GAluS	3
13	H-CogAff	16
14	CoJack	5
15	LIDA	6
16	PreAct	4
17	PRODIGY	3
18	PRS	4
19	Psi-Theory	10
20	R-CAST	2
21	Soar	6
22	Society of mind	6
23	Subsumption	2
24	WASABI	9
25	EMA	9
26	Haikonen (XCR-1)	13
27	Shanahan	9

В соответствии с рассматриваемыми критериями авторы указывают, что когнитивная архитектура H-CogAff (№13) является наиболее многообещающим подходом, общая оценка которой составила – 16.

В поисках определяющих характеристик искусственного сознания и мотивации робота к сознательному поведению происходит теоретическое становление сущности/понятия когнитивного робота и когнитивных биоинспирированных архитектур, которые могут

представлять собой точку отсчета в области проектирования сознания роботов. Широкое признание в решение этой проблемы получила теория глобального рабочего пространства (Global Workspace Theory, GTW), постулированная Баарсом в 1988 году [10].

Позднее теория глобального рабочего пространства стала источником вдохновения для дальнейших теорий искусственного сознания и реализаций современных когнитивных архитектур, что подтверждается следующими работами [6,10].

Проведенный анализ подчеркивает крайнюю актуальность и высокую прикладную ценность для такой области как интеллектуальные транспортные системы.

2. Разработка структурной схемы когнитивной транспортной системы

В настоящий момент нет однозначного определения понятия когнитивная архитектура и каждый автор когнитивист или исследователь в области искусственного интеллекта в зависимости от направлений и целей своего исследования вносит некую уникальную составляющую в общую структуру данного понятия. Чтобы сформировать фундамент этой структуры мы представим ряд определений и допущений с учетом, как современных работ, так и трудов послуживших истоками появления когнитивных архитектур.

Согласно A.Newell одного из основоположников, кто впервые заговорил о когнитивной архитектуре в работе [4] когнитивная архитектура - это теория интеллектуального поведения, которая определяет те аспекты познания, которые, как предполагается, остаются неизменными во времени и в разных областях. Это включает в себя хранилища памяти и представления элементов в этих воспоминаниях, но не их содержимое, которое изменяется в результате внешних стимулов и внутренней обработки [6].

Согласно [11] «когнитивные архитектуры» обозначают абстрактные модели познания в естественных и искусственных агентах, так и программные экземпляры таких моделей, которые затем используются в области искусственного интеллекта. Основная роль когнитивных архитектур в искусственном интеллекте заключается в том, что они позволяют реализовать искусственные системы, способные демонстрировать интеллектуальное поведение в общих условиях посредством подробной аналогии с конститутивным и развивающимся функционированием и механизмами, лежащими в основе человеческого познания.

Институт креативных технологий указывает на то что когнитивная архитектура - это гипотеза о фиксированных структурах, которые обеспечивают разум, будь то в естественных или искусственных системах, и о том, как они работают вместе - в сочетании со знаниями и навыками, воплощенными в архитектуре, - чтобы обеспечить разумное поведение в разнообразных сложных средах.

Согласно Varma S. [12] когнитивная архитектура - вычислительный формализм для выражения вычислительных моделей когнитивных явлений. Это отражает фундаментальное утверждение когнитивной революции о том, что познание - это форма обработки информации. По Varma S. [12] когнитивные архитекторы разрабатывают новые

вычислительные формализмы для выражения моделей, которые выдумывают ученые когнитивисты.

В [6] указывается, что на практике термин когнитивная архитектура определяется как план для интеллекта, или, более конкретно, предложение о ментальных представлениях и вычислительных процедурах, которые работают с этими представлениями, обеспечивая ряд интеллектуальных моделей поведения.

Схожей версии придерживается и Maes P. постулируя, что когнитивная архитектура - это методология; которая предоставляет систематические, функциональные и структурные рекомендации о том, как выполнять когнитивные процессы.

Делаются предположения, что когнитивная архитектура - это научное описание процесса человеческого познания и деятельности, то есть это больше, чем просто теория познания.

Таким образом, обобщая вышеизложенное можно заключить, что когнитивная архитектура – это теория развития процесса интеллектуального существования агента посредством его модели познания.

Агент может рассматриваться как естественный (живое существо), так и искусственный (робот, интеллектуальная система) объект. В данной работе объектом выступает когнитивная транспортная система или ее элементы.

Получив широкое распространение, парадигма когнитивной архитектуры привела к появлению множества фреймворков интеллектуальных и когнитивных систем, основным элементом которых являются структурные схемы.

Для разработки эффективной структурной схемы когнитивной транспортной системы мы попытаемся обобщить существующий накопленный опыт с учетом следующих работ:

4D / RCS (Real-time Control System)

4D/RCS представляет интеллектуальный контроллер с разнообразным спектром применения от беспилотных подводных и наземных транспортных средств до многоцелевых автоматизированных систем, (рис.5).

Внутренняя архитектура 4D / RCS согласно [8] состоит из многоуровневой иерархии вычислительных узлов, каждый из которых содержит элементы сенсорной обработки, модель мира, модуль оценочных суждений, элемент генерации поведения и базы данных знаний.

4D / RCS поддерживает следующие модели обучения: обучение без учителя, обучение с учителем, сочетание обучения без учителя и с учителем, обучение в реальном времени, обучение из произвольно больших и нестационарных баз данных.

Алгоритмы обучения, используемые в 4D / RCS, включают обучение с подкреплением.

В 4D / RCS реализованы следующие общие парадигмы: решение проблем, принятие решений на основе ценностных суждений.



Рис. 5. Узел когнитивной архитектуры 4D/ RCS, (из работы [13])

ALLIANCE – это программная архитектура, обеспечивающая совместное управление группами распределенных мобильных роботов, выполняющих миссии, состоящие из слабосвязанных подзадач.

Когнитивная архитектура ALLIANCE более подробно рассмотрена в [14]. Согласно данной работе, архитектура ALLIANCE определяет несколько наборов поведения, которые либо активны – групповой режим, либо находятся в спящем режиме. На (рис. 6) общая архитектура иллюстрирует три таких набора поведения.

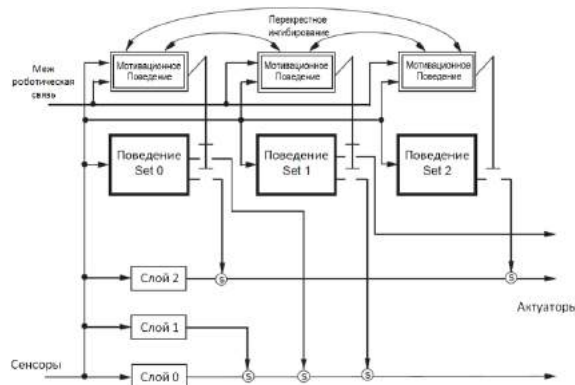


Рис.6. Когнитивная архитектура ALLIANCE, реализованная на каждом роботе в кооперативной команде, из работы [14]

Каждому набору поведения робота соответствуют уровни компетентности, которые требуются для выполнения некоторых высокоуровневых функций по достижению задач.

Согласно [14] архитектура ALLIANCE повышает устойчивость группы за счет мотивационного поведения, механизм которого постоянно отслеживает сенсорную обратную связь о задачах, которые может выполнять робот, адаптируя действия, выбранные этим роботом, к текущей обратной связи окружающей среды и действиям его товарищей по команде [14].

LIDA (Learning Intelligent Distribution Agent)

Когнитивная архитектура агентного распределенного интеллектуального обучения LIDA, (рис.7) была разработана Стэном Франклином и его коллегами из Университета Мемфиса. Подробное описание архитектуры LIDA содержится в работе [8].



Рис. 7. Основные архитектурные компоненты и когнитивный цикл LIDA (из работы [8])

Согласно [8] LIDA является биоинспирированной архитектурой и создавалась для моделирования процессов познания, а также поддержки управляющих структур для программных агентов и роботов.

Основные компоненты, участвующие в когнитивном цикле, представленном на рис. 7, включают сенсорную память, перцептивную ассоциативную память, рабочее пространство, временную эпизодическую память, декларативную память, глобальное рабочее пространство, процедурную память, выбор действий, сенсомоторную память.

Архитектура LIDA согласно работе [8] поддерживает следующие функции и компоненты: рабочая память или рабочее пространство со значительной внутренней структурой, включая текущую ситуационную модель, семантическая память (реализованная автоматически как часть декларативной памяти через распределенную

память), эпизодическая память (как декларативная память, так и временная эпизодическая память, закодированы через распределенную память), сенсорная память, перцептивная память (семантическая сеть с активацией), система вознаграждения (узлы чувств и эмоций в перцептивной ассоциативной памяти), контроль внимания.

Алгоритмы обучения, используемые в LIDA, включают обучение с подкреплением и изучение новых представлений, согласно [8].

Не полный представленный обзор когнитивных архитектур, дополненный работами [6, 7, 8] позволяет выявить следующие обобщенные факторы:

- модульное разделение функций восприятия, понимания и оценки, генерации действия, а также планирования и памяти;
- независимость слоев подсистем;
- использование модели мира при реализации функции обучения;
- наличие разноуровневых баз знаний.

При разработке структурной схемы архитектуры когнитивной транспортной системы мы также будем опираться на методологические аспекты построения, изложенные в [7], с учетом прикладных особенностей информационно-телекоммуникационной системы, обеспечивающей поддержку когнитивных транспортных процессов и современных подходов интеллектуализации.

На основе исследованных работ, проведенного анализа и сформулированных факторов нами разработана структурная схема архитектуры когнитивной транспортной системы, представленная на (рис. 8).

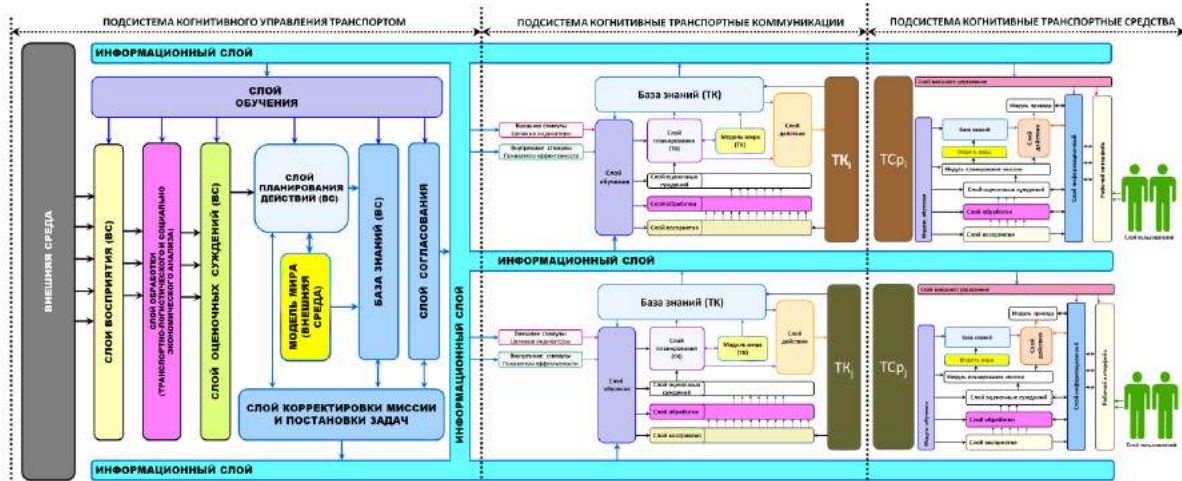


Рис. 8. Структурная схема когнитивной транспортной системы

Данная архитектура имеет следующие особенности:

- три основные подсистемы – когнитивное управление транспортом, когнитивные транспортные коммуникации (ТК), когнитивные транспортные средства (ТСр); Индексы «i» и «j» введены формально и указывают на различные виды транспортных средств и соответствующих им транспортные коммуникации, с учетом возможности

масштабируемости и роста разнообразия видов транспорта;

- модульная архитектура упрощает формализацию однородных процессов;
- информационный слой рассматривается как равнодоступный для всех подсистем;
- каждая из подсистем имеет выделенные в рамках различных видов транспорта «Базы знаний», так как функции и процессы различны;

- существует структурное подобие вложенных архитектур: слои «Восприятия», «Обработки», «Оценочных суждений» и «Планирования» ввиду биоинспирированности когнитивной архитектуры;

- структурные элементы архитектуры на данном этапе не детализируются, чтобы отразить их модульность;

- выделен в отдельный структурный элемент «слой внешнего управления» в подсистеме когнитивных транспортных средств, так как в случае режима группового или кооперативного режима функционирования транспорта управление будет осуществляться, минуя внутреннюю модель обучения конкретного транспортного средства;

- выделен в отдельный структурный элемент «Слой пользователь» так как посредством «рабочего интерфейса» в индивидуальном порядке он может выбирать режим управления транспортным средством;

- введен «слой согласования» для обеспечения реляционного согласования целевых показателей когнитивных подсистем;

- введен «слой корректировки миссии и постановки задач», с целью повышения эффективности когнитивной транспортной системы в допустимых ограничениях.

Описание функционала слоев в данной статье рассмотрено не будет, так как этот материал заслуживает отдельной темы. Если в качестве примера кратко рассмотреть, например *слой восприятия* то в зависимости от вида подсистем он содержит специализированные устройства извлечения информации, для *подсистемы когнитивных транспортных средств* такими устройствами служат бортовые видеокамеры, лидары, датчики состояния, радары, GPS, ГЛОНАСС, навигационные устройства; для *подсистемы когнитивных транспортных коммуникаций* (в зависимости от вида транспорта) – системы комплексного мониторинга, данные с детекторов, данные с систем фиксации RFID меток и др.; для *подсистемы когнитивного управления* – данные систем транспортно-логистического мониторинга, социально-экономические показатели, транспортный баланс, показатели и индикаторы транспортных сетей по видам транспорта и другие.

Заключение

Развитие технологий по созданию человекоподобного искусственного интеллекта и разработки интеллектуальных систем, использующих алгоритмы схожие с мыслительной обработкой мозга, стимулируют поиски новых подходов для проектирования системных архитектур, способных воплотить цифровизацию процессов человеческого познания и создать искусственный интеллект человеческого уровня. Для выполнения столь сложных задач используются когнитивные архитектуры, представляя собой следующий уровень развития разнородных процессов интеллектуализации.

Когнитивная транспортная система представляет собой следующую ступень развития после интеллектуальной транспортной системы. Базовый элемент системы – ее архитектура. С этой целью нами была разработана структурная схема когнитивной транспортной системы, которая в последствие будет служить основой для создания системной архитектуры.

При создании структурной схемы когнитивной транспортной системы использовались современные методологические концепции такие как [7]. Реализованы основные требования согласно [4-8] - модульность, объектно-ориентированность и параллелизм.

Разработанная когнитивная архитектура допускает возможность применения современных моделей интеллектуального анализа данных, и обучения на каждом уровне подсистем (в том числе обучение без учителя с учетом обновления параметров системы управления в режиме реального времени), обучение с учителем (с учетом мнения экспертов в предметной области), обучение с подкреплением и глубокое обучение с подкреплением.

Технологический потенциал разработанной когнитивной архитектуры превосходит существующие аналоги такие как [15], позволяет осуществить надстройку процессов интеллектуализации посредством многоуровневого обучения, позволяет обеспечить интеграцию с существующими транспортными интеллектуальными системами.

Литература

1. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Осадчий А.И. Разработка терминологического базиса когнитивной транспортной системы // В сборнике: ТРАНСПОРТ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ – 2020. Материалы Юбилейной международной научно-практической конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Отделение нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук; Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук; Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. С. 116-120.
2. Ogiela M.R., Ko H. Cognitive systems and operations research in big data and cloud computing // Ann Oper Res 265, 2018, pp 183–186. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2861-8>
3. Langley P. Progress and Challenges in Research on Cognitive Architectures // Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-17). 2017, pp 4870 – 4876. Доступно по ссылке на 14.11.2021. <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/11150/11009>
4. Newell A. Physical symbol systems // Cogn Sci 4(2), 1980, pp 135–183
5. Newell A. Précis of unified theories of cognition // Behav Brain Sci 15, 1992, pp. 425–492
6. Kotseruba I., Tsotsos J.K. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications // Artif Intell Rev 53, 2020, pp. 17–94. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9646-y>
7. Jiménez J.P., Martin L., Dounce I.A. et al. Methodological aspects for cognitive architectures construction: a study and proposal // Artif Intell Rev 54, 2021, pp 2133–2192. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09901-x>

8. Samsonovich A.V Toward a unified catalog of implemented cognitive architectures // In: Proceeding of the conference on biologically inspired cognitive architectures, 2010, pp 195–244, doi: 10.3233/978-1-60750-660-7-195
9. Toshev A., Talanov M. Artificial Cognitive Architectures Review. // BioNanoScience. 2020, pp. 13. doi:10.1007/s12668-020-00768-4
10. Signa A., Chella A. & Gentile M. Cognitive Robots and the Conscious Mind: A Review of the Global Workspace Theory. // Curr Robot Rep 2, 2021, pp 125–131. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00044-7>
11. Lieto A., Bhatt M., Oltramari A., & Vernon, D. The role of cognitive architectures in general artificial intelligence // Cognitive Systems Research, 48, 2018, pp 1–3. doi:10.1016/j.cogsys.2017.08.003
12. Varma S. The subjective meaning of cognitive architecture: a Marrian analysis // Frontiers in Psychology, 5. 2014. pp 10. doi:10.3389/fpsyg.2014.00440
13. Albus J. S., Huang H. M., Messina E. R., Murphy K., Juberts M., Lacaze A., ..et al. 4D/RCS Version 2.0: A reference model architecture for unmanned vehicle systems (No. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)-6910).2002, 168p. https://www.researchgate.net/publication/2415889_4DRCS_A_Reference_Model_Architecture_For_Unmanned_Vehicle_Systems_Version_20 доступно на 15.11.2021.
14. Parker L. E. ALLIANCE: an architecture for fault tolerant multirobot cooperation // IEEE Transactions on Robotics and Automation, 14(2), 1998, pp 220–240. doi:10.1109/70.681242
15. Malygin I.G., Korolev O.A., Komashinskiy V. Introduction into cognitive multimodal transportation systems// TRANSPORTATION RESEARCH PROCEDIA. XIV International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (OTS-2020). 2020. pp. 273-279.

References

1. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Osadchij A.I. Razrabotka terminologicheskogo bazisa kognitivnoj transportnoj sistemy [Development of the terminological basis of a cognitive transportation system]. V sbornike: TRANSPORT ROSSII: PROBLEMY I PERSPEKTIVY. 2020. Materialy YUbilejnoj mezhdunarodnoj nauchno–prakticheskoy konferencii. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii; Otdelenie nanotekhnologij i informacionnyh tekhnologij Rossijskoj akademii nauk; Institut problem transporta im. N.S. Solomenko Rossijskoj akademii nauk; Sankt-Peterburgskij universitet Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii. 2020. S. 116-120.
2. Ogiela M.R., Ko H. Cognitive systems and operations research in big data and cloud computing. Ann Oper Res 265, 2018, pp 183–186. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2861-8>
3. Langley P. Progress and Challenges in Research on Cognitive Architectures. Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-17). 2017, pp 4870 – 4876. Dostupno po sсыlki na 14.11.2021. <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/11150/11009>
4. Newell A. Physical symbol systems. Cogn Sci 4(2), 1980, pp 135–183
5. Newell A. Précis of unified theories of cognition. Behav Brain Sci 15, 1992, pp. 425–492
6. Kotseruba I., Tsotsos J.K. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications. Artif Intell Rev 53, 2020, pp. 17–94. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9646-y>
7. Jiménez J.P., Martin L., Dounce I.A. et al. Methodological aspects for cognitive architectures construction: a study and proposal. Artif Intell Rev 54, 2021, pp 2133–2192. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09901-x>
8. Samsonovich A.V Toward a unified catalog of implemented cognitive architectures. In: Proceeding of the conference on biologically inspired cognitive architectures, 2010, pp 195–244, doi: 10.3233/978-1-60750-660-7-195
9. Toshev A., Talanov M. Artificial Cognitive Architectures Review. BioNanoScience. 2020, pp. 13. doi:10.1007/s12668-020-00768-4
10. Signa A., Chella A. & Gentile M. Cognitive Robots and the Conscious Mind: A Review of the Global Workspace Theory. Curr Robot Rep 2, 2021, pp 125–131. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00044-7>
11. Lieto A., Bhatt M., Oltramari A., & Vernon, D. The role of cognitive architectures in general artificial intelligence. Cognitive Systems Research, 48, 2018, pp 1–3. doi:10.1016/j.cogsys.2017.08.003
12. Varma S. The subjective meaning of cognitive architecture: a Marrian analysis. Frontiers in Psychology, 5. 2014. pp 10. doi:10.3389/fpsyg.2014.00440
13. Albus J. S., Huang H. M., Messina E. R., Murphy K., Juberts M., Lacaze A., ..et al. 4D/RCS Version 2.0: A reference model architecture for unmanned vehicle systems (No. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)-6910).2002, 168p. https://www.researchgate.net/publication/2415889_4DRCS_A_Reference_Model_Architecture_For_Unmanned_Vehicle_Systems_Version_20 доступно на 15.11.2021.
14. Parker L. E. ALLIANCE: an architecture for fault tolerant multirobot cooperation. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 14(2), 1998, pp 220–240. doi:10.1109/70.681242
15. Malygin I.G., Korolev O.A., Komashinskiy V. Introduction into cognitive multimodal transportation systems. TRANSPORTATION RESEARCH PROCEDIA. XIV International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (OTS-2020). 2020. pp. 273-279.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Святослав Александрович Селиверстов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Ярослав Александрович Селиверстов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Алексей Геннадьевич Котенко, доктор технических наук, профессор, заведующей лабораторией проблем организации транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: algenko@gmail.com

Ольга Юрьевна Лукомская, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: luol@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: shatillen@mail.ru

Ольга Владимировна Бородина, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: borodinaov@gmail.com

Svyatoslav A. Seliverstov, Phd (Eng), Senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Yaroslav A. Seliverstov, Phd (Eng), Senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Aleksey G. Kotenko, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Laboratory for Problems of Transport Systems Organization, , Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: algenko@gmail.com

Ol'ga Yu. Lukomskaya, PhD (Eng), associate Professor, Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: luol@mail.ru

Natalya V. Shatalova, PhD (Eng), Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: shatillen@mail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: borodinaov@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 26.11.2021

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 629.5.052

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.049>

Комплексная автоматизация судовых технологических процессов колесных судов

Е.М. Бурда¹, e-mail: Burda1951@mail.ru, С.В. Переvezенцев¹, e-mail: sergpsv70@gmail.com, В.И. Плющев¹, e-mail: vip3345@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация Появление судов с колесным движительно-рулевым комплексом, обладающих рядом специфических конструктивных и динамических особенностей, потребовало новых подходов к созданию алгоритмической и аппаратной базы для создания систем управления, обеспечивающих безопасную и эффективную эксплуатацию судов этого типа. Представлена структура судовой электростанции, ее особенности, связанные с обеспечением работы электропривода гребных колес и выполнения функций энергосбережения и резервирования. Приведены этапы развития комплексной системы контроля и управления для судов с колесным движительно-рулевым комплексом. Рассмотрена структура распределенной системы и ее аппаратная база, дающая широкие возможности автоматизации как отдельных подсистем и судовых технологических процессов, так и судна в целом. Приведены отдельные алгоритмы управления, реализованные в системе. Система позволяет модернизировать алгоритмическое обеспечение в процессе эксплуатации судна по мере возникновения ситуаций, требующих его коррекции. Обновление программных модулей не требует изменения структуры системы или аппаратной части системы.

Ключевые слова: автоматизация судоходства, колесный движительно-рулевой комплекс, распределенная система управления, электродвижение.

Integrated automation of wheeled ships technological processes

Evgeny. M. Burda¹, e-mail: Burda1951@mail.ru, Sergey V. Perevezentsev¹, e-mail: sergpsv70@gmail.com, Valery.I. Plyushchaev¹, e-mail: vip3345@yandex.ru

¹Volga state university for water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The appearance of ships with wheeled propulsion/steering system with a number of specific structural and dynamic features required new approaches to creation of algorithmic and hardware base for creation of control systems ensuring safe and efficient operation of this type of ships. The structure of the ship's power plant, its features related to ensuring the operation of the electric drive of the propeller wheels and performing the functions of energy saving and redundancy are presented. The stages of development of integrated control and management system for ships with wheeled propulsion/steering system are given in the article. The distribution system structure and its hardware base are considered. The hardware base gives ample opportunities for automation both individual subsystems and the ship technological processes, and the ship as a whole. Some control algorithms implemented in the system are described. The system makes it possible to upgrade algorithmic support during the operation of the vessel as situations requiring its adjustment arise. Updating software modules does not require changing the system structure or the system hardware.

Keywords: automation of navigation, wheeled propulsion/steering system, distributed control system, electric propulsion.

Введение

В России появились суда нового типа – с колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК). В качестве движителей применяется два гребных колеса, расположенных по бортам в кормовой части судна. Маневрирование осуществляется путем изменения соотношения частот вращения гребных колес [1].

Гребные колеса на судах данного типа через редуктор соединены с асинхронными двигателями. Управление электрическими двигателями осуществляется преобразователями частоты. Такой подход позволил существенно упростить механику привода и обеспечить плавное регулирование частоты вращения гребных колес в диапазоне от нуля до максимального значения (эта величина различна для разных судов), что предопределяет высокую маневренность судна. Плавный пуск обеспечивает минимизацию механических нагрузок на элементы движителя, а ограничение пусковых

токов увеличивает срок эксплуатации двигателей, существенно снижает требования к мощности генераторов судовой электростанции. На данный момент построены и эксплуатируются три судна данной серии - «Сура», «Колесовъ» и «Доброходъ».

На судах установлены два асинхронных электродвигателя мощностью 75 кВт. Они питаются от единой электростанции (два дизель-генератора мощностью по 100кВт), обеспечивающей также питание всех общесудовых потребителей. Резкое падение потребляемой приводами мощности при снижении частоты вращения гребных колес (в 2 раза при снижении на 20%) позволяет существенно экономить топливо при движении на среднем ходу (120-130 кг топлива на 100 км пути).

В настоящее время завершается строительство 2 круизных теплоходов проекта ПКС -180 «Золотое кольцо» на 180 пассажиров. (рис.1). Габариты этого судна составляют 81,6 * 13,8 * 9,5 м, осадка судна всего 1,2 м. Уникальной особенностью данного судна является сочетание движителей – двух гребных

колес и азимутального подруливающего устройства (АПУ) [3].



Рис. 1. Судно «Золотое кольцо»

1. Энергетическая установка судна

Мощность электродвигателей гребных колес составляет 315 кВт при необходимой расчетной мощности 250 кВт, что позволяет обеспечить максимальную скорость судна 18 км/час и необходимый запас по мощности при активном маневрировании [2]. Структурная схема судовой

электростанции приведена на рисунке 2. На судне установлено 3 дизель-генератора по 320 кВт, подключаемые на общую шину через электромагнитные контакторы QF1G, QF2G и QF3G. Предусмотрена возможность запитать общую шину от внешнего (берегового) источника питания через контактор QFБ во время стоянки судна у причала. Подключение к шине частотных преобразователей (ПЧ1 и ПЧ2), обеспечивающих работу асинхронных двигателей привода колес (М1 и М2), осуществляется через контакторы QF1М и QF2М. Подключение носового азимутального подруливающего устройства к общей шине выполняется контактором QFнпу. Аналогичным образом с помощью контакторов подключены и судовые потребители. Такая схема подключения позволила реализовать дистанционный режим управления главным распределительным щитом (ГРЩ) из рубки.

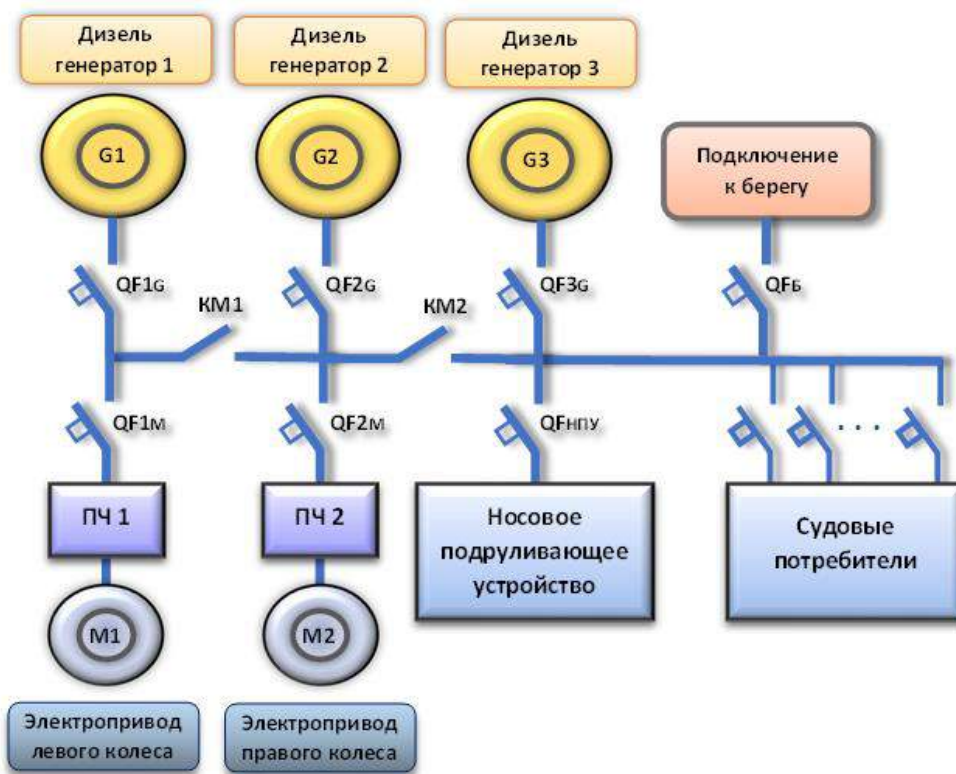


Рис. 2. Структура КСКУ второго поколения

На общей шине установлены два разделительных контактора КМ1 и КМ2. С их помощью обеспечивается возможность разделения общей шины на два или три отдельных сегмента. Это позволило реализовать работу электростанции в трех режимах.

В первом режиме (полный ход) каждый гребной электродвигатель подключен через преобразователь частоты к своему генератору, а потребители судна питаются от третьего генератора. Во втором режиме (экономный ход - не более 75% от максимальной скорости) оба гребных электродвигателя питаются от одного генератора. В третьем (аварийном) режиме гребные электродвигатели и все необходимые потребители питаются от одного дизель-генератора.

Скорость хода судна при этом ограничена 50% от максимальной.

Главный распределительный щит электростанции автоматически меняет режим работы при выходе из строя любого генератора. Время переключения питающей цепи составляет менее 1с (что удовлетворяет требованиям Речного Регистра). С учетом инерционности привода гребных колес, переключение режимов работы электростанции практически не сказывается на управляемости судна. Подхват заданной скорости вращения колеса «на ходу» происходит автоматически после восстановления питания. При этом сохранена функция «нулевой защиты». Предусмотрен ручной режим выбора работы

электростанции, который может осуществляться как с ГРЩ, так и дистанционно из рубки с пульта управления судном.

Использование преобразователей частоты определяет высокую надежность работы двигателей судна. Многоуровневая встроенная система защиты преобразователей обеспечивает безопасную и эффективную работу всей технологической цепи (самих преобразователей частоты, электродвигателей гребных колес, механических узлов привода). Исключается самопроизвольный пуск приводов, при перегрузках автоматически снижается частота вращения гребных колес (что позволяет избежать механических поломок узлов приводов или перегрузок судовой электростанции), происходит автоматическое восстановление частоты вращения колес при исчезновении перегрузок, обеспечивается работоспособность приводов при уменьшении напряжения в судовой сети до 50% и т.п. Время торможения с максимальной частоты вращения до нуля составляет 2-3с (что обеспечивают тормозные сопротивления с установленной мощностью до 1,5 кВт).

На данных судах особенностью является отсутствие длительной параллельной работы дизель – генераторов. Высокий процент высших гармоник мешает эффективной работе систем распределения активной и реактивной мощности. На колесном судне «Сура» была опробована схема псевдопараллельной работы преобразователей, когда преобразователи частоты объединяются по звену постоянного тока и их инверторы фактически питаются от одного общего источника. Это позволило выровнять нагрузку генераторов при маневрировании судна [3].

Использование преобразователей частоты позволяет оптимизировать работу двигателей (получить высокий КПД). Известная зависимость КПД η от кажущегося скольжения S описывается следующей формулой

$$\eta = (0,5 + 0,6 \sqrt[3]{S})(1-S),$$

где $S = 1 - V/C$;

V — скорость судна, м/с;

C — линейная скорость плицы колеса, м/с.

Следует отметить, что поддержание оптимального КПД колеса эффективно при плавном разгоне судна или движения судна на скоростях 0,5-0,8 от максимальной скорости судна. При экстренном маневрировании и движении на максимальных скоростях на первое место выходит создание необходимого упора, а не поддержание заданного кажущегося скольжения. При максимально возможном темпе разгона судна КПД колеса не превышает 30% (при этом оптимальный КПД находится в районе 65 %). Время выхода судна на заданную скорость при оптимизации КПД увеличивается в 1,3 раза, но при этом оптимизация темпа разгона судна позволяет сэкономить около 10% топлива [4].

2. Комплексная система контроля и управления судном

Суда с КДРК существенно отличаются от традиционных судов с винто-рулевым комплексом как конструктивными особенностями, так и своими динамическими характеристиками, а следовательно,

и принципами управления. Как показывает практика суда этого типа предъявляют особые требования к качеству управления.

Полностью раскрыть потенциальные возможности судов с КДРК, учесть их конструктивные и динамические особенности, а следовательно, повысить эффективность и безопасность эксплуатации позволяет их полная автоматизация. Эта задача была решена при создании комплексной системы контроля и управления (КСКУ) для судов этого типа. При ее разработке требовалось учесть специфические особенности судна с КДРК. Кроме того, принципы построения системы и ее аппаратная база должны допускать развитие систем. КСКУ первого поколения была установлена на судне «Сура», второго поколения – на судах «Колесовъ» и «Доброходъ» [5], третье поколение будет установлено на судно «Золотое кольцо».

Можно выделить основные функции КСКУ:

- контроль и управление колесным движительно-рулевым комплексом;
- реализация алгоритмов автоматического управления отдельными операциями судовождения (формирование заданного вектора тяги, удержание на курсе, движение по заданной траектории, швартовка, совместное управление тремя движителями одним исполнительным устройством (джойстиком) и пр.);
- контроль и управление отдельными агрегатами и судовыми комплексами (главный распределительный щит, система топливоподготовки, судовая электростанция, система кондиционирования и др.);
- аварийно-предупредительная сигнализация;
- диагностика.

КСКУ представляет собой распределенную систему. Она выполнена на базе двух панельных компьютеров с сенсорными экранами, расположенными в рулевой рубке и трех контроллеров, расположенных в помещениях судна с наибольшим количеством механизмов управления и датчиков. К контроллерам подключаются датчики объектов контроля и исполнительные устройства. Связь между панельными компьютерами и контроллерами реализована с помощью Industrial Ethernet коммутаторов, поддерживающих технологию сетевого резервирования – «Turbo Ring». Частотные приводы и часть датчиков связаны с контроллером машинного отделения шиной RS-485, остальные датчики и исполнительные устройства подключены к контроллерам физическим линиям минимальной длины. Контроллеры опрашивают датчики, проводят первичную обработку информации и ее передачу на компьютеры, а также обеспечивают обратную передачу сигналов управления на исполнительные механизмы. Реализованная структура КСКУ позволяет получить максимальную скорость передачи информации по каналам связи и обеспечивает минимальные затраты на прокладку кабельных трасс по судну (длина и количество кабелей сокращается на порядок по сравнению с традиционными электрическими системами управления). Использование распределенной иерархической структуры закладывает неограниченные возможности по дальнейшей модернизации системы. На рис. 3 представлена структура КСКУ второго поколения

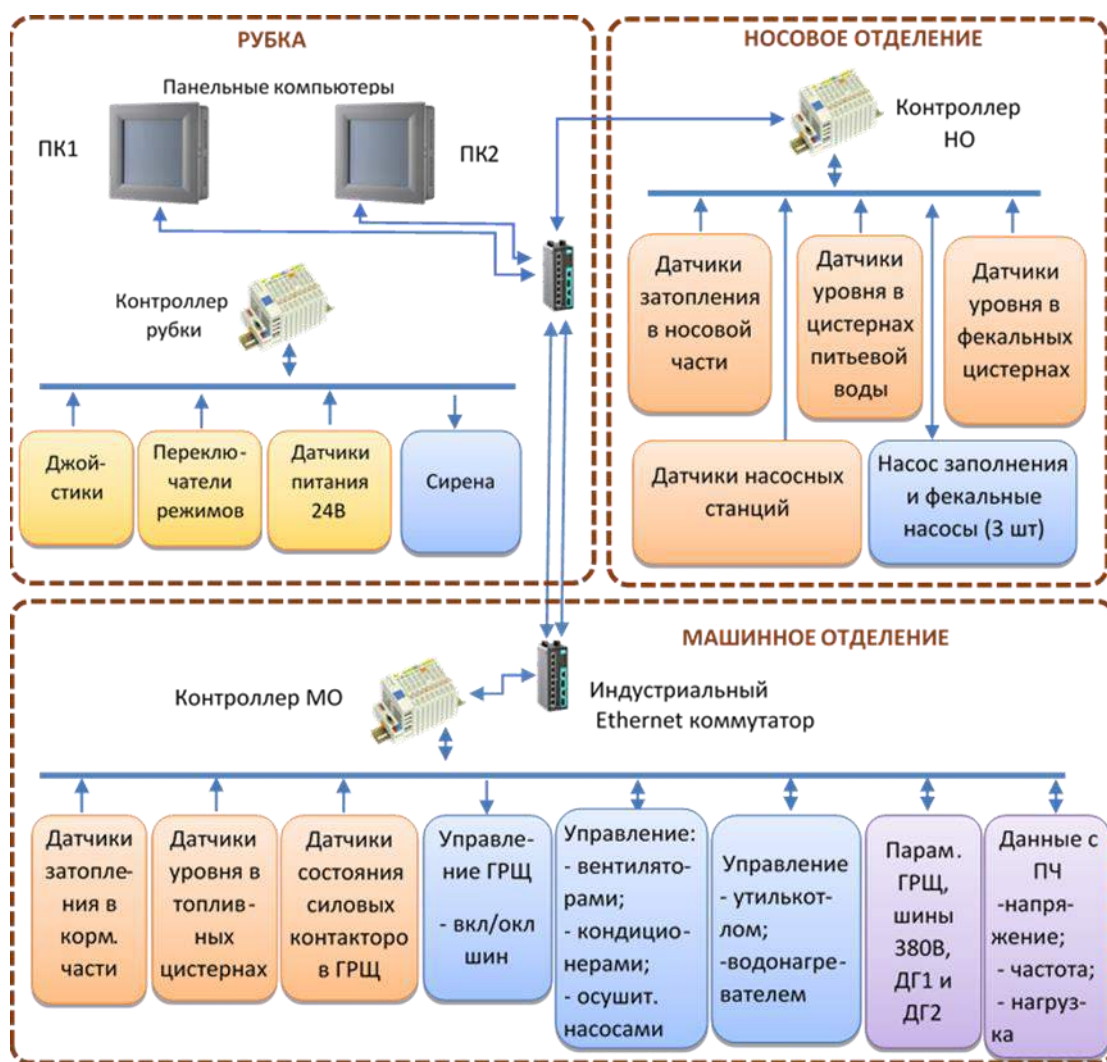


Рис. 3. Структура КСКУ второго поколения

КСКУ позволяет собирать и отображать подробную информацию о состоянии основных систем судна, обеспечивает местное и дистанционное управление судовыми механизмами и агрегатами. Все параметры и режимы работы систем отображаются на экранах панельных компьютеров (представляющих основной и резервный пульт судоводителя, рис. 4). Функция сенсорного ввода панельных компьютеров позволяет реализовать дистанционное управление судовыми механизмами и агрегатами, а также быстрое приключение между информационными окнами КСКУ. Управление приводами гребных колес осуществляется двумя джойстиком, что позволяет реализовать два варианта управления. Первый – каждый джойстик формирует независимое управляющее воздействие на один из приводов гребных колес. Такой режим необходим при активном маневрировании, швартовке и прочих операциях. Второй вариант – одним из джойстиков задается необходимый курс судна (при этом компьютер вычисляет соотношения необходимых значений оборотов гребных колес для перехода на новый курс), вторым джойстиком задается скорость движения судна.



Рис. 4. Рубка судна «Колесовъ»

3. Экранные формы системы контроля и управления судном

Для КСКУ был специально разработан интерфейс в виде экранных форм, учитывающих особенность судов с колесным движительно-рулевым комплексом. Примером может служить требования нормативных документов к отображению на пульте

оператора положения руля. На судах с КДРК традиционный руль отсутствует, поэтому на панели оператора отображается направление суммарного вектора упора, рассчитываемое компьютером по соотношению частот вращения гребных колес («виртуальный» руль).

Представленные на панельном компьютере экранные формы функционально разделены на два уровня:

- окна системных экранов, позволяющие в виде мнемосхем и индикаторов выводить информацию о состоянии судовых систем для оперативного контроля основных параметров;

- окна служебных панелей, отображающих изображение механизмов и кнопок управления (предназначены для дистанционного управления судовыми устройствами).

Все системные окна имеют однотипную конфигурацию. В верхней части окна расположено меню доступа к судовым системам в виде графических кнопок. Нажатие соответствующей кнопки обеспечивает переход на мнемосхему соответствующей судовой системы (отображается в центральной части окна). В КСКУ реализованы: рулевая система, система водоснабжения, осушительная система, система электроснабжения, сточно-фановая система, топливная система и система диагностика.

На рис. 5 показана основная экранная форма – рулевая система, позволяющая судоводителю оценивать поведение судна. КСКУ рассчитывает и отображает на мониторе ориентацию судна в пространстве, информацию о положении джойстиков, достигнутой частоте вращения колес, нагрузке электроприводов, угле вектора упора и состоянии дизель-генераторов и частотных преобразователей

котором отображается состояние выбранного объекта и кнопки дистанционного управления механизмом.

В системе заложена возможность реализации трех режимов управления КДРК. Управление осуществляется двумя джойстиками.

В аварийном (ручном) режиме управления КДРК управляющие воздействия с джойстиков по отдельным кабелям подаются на частотные приводы гребных колес. В этом режиме для каждого гребного колеса предусмотрена возможность задания трех значений частот вращения вперед и назад (управляющие сигналы с релейных контактов джойстиков подаются на дискретные входы частотного преобразователя, в котором программируется соответствующая скорость вращения асинхронного двигателя в зависимости от состояния дискретных входов). При этом КСКУ по шине RS-485 считывает параметры с частотных преобразователей (текущий ток, частота вращения АД, развиваемый момент и пр.), вычисляет вектор упора (аналог положения пера руля) и отражает его вместе с другими параметрами движения на экране панельного компьютера для судоводителя.

В маневровом режиме управляющие воздействия с джойстиков снимаются в виде аналоговых сигналов, что позволяет КСКУ формировать шесть ступеней управления для движения вперед и шесть для движения назад. В системе предусмотрена возможность задания фиксированных значений частот вращения колеса для каждой ступени управления. Такой подход позволяет судоводителю «плавно» управлять оборотами гребных колес, обеспечивая высокие качественные характеристики процесса управления судном. Маневровый режим используется при выполнении судном маневров расхождения и обгона, швартовых операций и циркуляции. В КСКУ реализован алгоритм ограничения по моменту и току электродвигателей гребных колес, что обеспечивает исключение перегрузочных режимов работы дизель-генераторов и возможности их аварийной остановки. Также реализован алгоритм плавного увеличения или сброса нагрузки (при резком перемещении джойстиков судоводителем).

В ходовом режиме КСКУ эмулирует традиционное управление судном с помощью руля. На экране панельного компьютера отображается положение «виртуального» руля, которое соответствует вектору создаваемого упора, таким образом, освобождая судоводителя от сложного выбора задания частот вращения для левого и правого колес при движении судна по судовому ходу. Частота вращения для обоих колес, определяющая упор или скорость движения судна, задается левым джойстиком, правый джойстик задает направление и величину угловой скорости поворота судна (перемещение джойстика влево или вправо задает угол вектора упора колес, отображаемый на экране в виде отклонения «виртуального» руля от диаметральной плоскости судна).

Смена курса судна производится за счет изменения соотношения частот вращения колес. Первоначально увеличивается частота вращения одного из колес, что обеспечивает поворот судна без потери скорости. Если частота вращения колеса достигает максимального значения, производится



Рис. 5. Экранная форма «Рулевая система»

В нижней части экранной формы «Рулевая система» расположены панель индикации предупредительных и аварийных параметров, кнопки выбора палитры экрана, а также индикаторы объединённой системы АПС (аварийно-предупредительной сигнализации), которые информируют об аварийной ситуации в судовых системах. Для управления судовыми устройствам необходимо нажать пальцем на графическое обозначение механизма, после этого на экране панельного компьютера появится служебное окно, в

уменьшение числа оборотов колеса противоположного борта. Судно может развернуться на месте при вращении колес в противоположном направлении (алгоритм реализован в режиме «Циркуляция»). Медленный разворот судна в ходовом режиме реализуется при нулевой скорости судна (левый джойстик в нулевом положении, правым джойстиком задается необходимая угловая скорость поворота). При выполнении этого маневра вращается только одно колесо. Для быстрой установки «виртуального» руля в нулевое положение нажимается кнопка, расположенная в верхней части левого джойстика (задается одинаковая частота вращения для обоих колес).

Выбранная структура и аппаратная база позволяют легко модернизировать систему и существенно наращивать ее функциональные возможности.

4. Система управление судна «Золотое кольцо»

КСКУ третьего поколения (для судна «Золотое кольцо») имеет существенно расширенный объем функций (например, появился мониторинг балластных цистерн). В составе системы появились два дополнительных пульта на крыльях ходовой рубки (для управления швартовыми операциями), увеличилось число контроллеров, точек контроля (более 200) и управляемых узлов.

На судне «Золотое кольцо» впервые используются два вида движителей. Наряду с двумя гребными колесами на судне смонтировано АПУ, предназначенное, в основном, для повышения безопасности швартовых операций. Для изучения динамики судна и отработки алгоритмов была разработана математическая модель судна, позволяющая проводить исследование его динамических характеристик в различных эксплуатационных режимах [6].

Совместное управление всеми движителями позволяет реализовать движение судна лагом, причем практически по любой траектории (при этом может поддерживаться заданное положение ДП судна относительно причальной стенки). АПУ имеет частотный привод, обеспечивающий возможность плавного изменения вектора тяги как по величине от 0 до максимального значения, так и по направлению в пределах 360° . За счет этого появляется возможность погасить продольную скорость судна, уравновесить вращающие моменты, создаваемые всеми движителями, и обеспечить перемещение судна лагом в сторону причальной стенки [7,8]. С использованием математической модели [6] были исследованы различные варианты движения судна лагом, в том числе при внешних ветровых воздействиях. Некоторые результаты приведены ниже. На рис. 6 представлено перемещение судна под заданным углом в 90° по отношению к первоначальному курсу (при этом частота вращения гребных колес отличается вдвое - 0,05 1/с и 0,1 1/с).

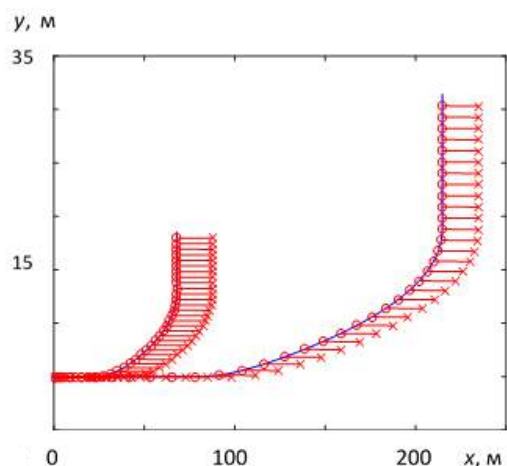


Рис. 6. Перемещение судна лагом под углом 90°

Продольная скорость V за счет АПУ уменьшается до нуля, а поперечная V_p (за счет сложения поперечных составляющих векторов тяги гребного колеса и АПУ) стабилизируется на некотором уровне (рис. 7).

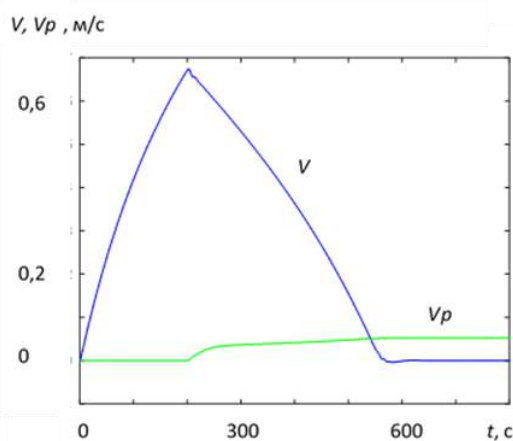


Рис. 7. Изменение продольной и поперечной скорости движения судна

Управление тремя движителями можно осуществлять одним исполнительным устройством (4-х координатным джойстиком). Судоводитель, задавая для судна направление движения (направление наклона джойстика), скорость (степень наклона джойстика) и положение ДП судна (поворот головки джойстика), как показывают результаты моделирования, может заставить двигаться судно по любой траектории (пример приведен на рис. 8, где 1,2,3,4 – различные положения джойстика).

Следует отметить, что используемое на судне сочетание движителей, обеспечивает движение лагом (в любом направлении) в весьма ограниченном диапазоне частот вращения гребного колеса – до 0,1 1/с или 6 об/мин. При больших частотах вращения гребного колеса заложенное в проекте азимутальное подруливающее устройство не может компенсировать упор гребного колеса, т.е. движение лагом становится невозможным.

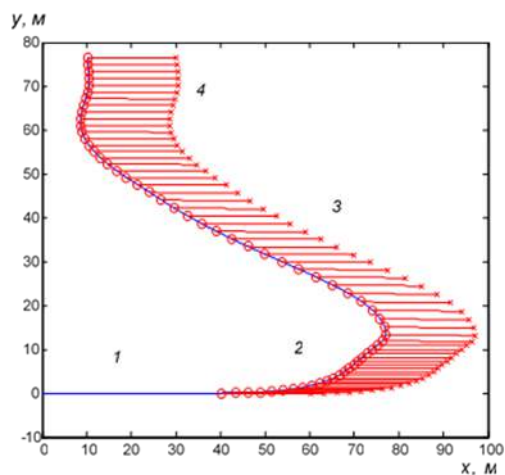


Рис. 8. Перемещение судна лагом по заданной траектории

Суда с КДРК являются плоскодонными, имеют очень маленькую осадку и большую парусность (площадь боковой проекции судна «Золотое кольцо» составляет примерно 680 м², поперечной проекции – около 110 м²). Поэтому ветровое воздействие оказывает существенное влияние на качество управления судном.

Удалось разработать алгоритмы, позволяющие судну двигаться по нужной траектории с незначительными отклонениями. Были исследованы различные модификации алгоритма управления в разных эксплуатационных режимах (в том числе при ветровом воздействии). Результаты одного из вариантов расчетов динамических характеристик судна при боковом ветре ($V_b = 3$ м/с) представлены на рис. 12 (действие ветра при моделировании начинается на 300 с, частота вращения гребных колес составляет половину от максимально возможной, линии показывают положение корпуса судна). Алгоритм позволяет судну двигаться по заданной траектории со статической ошибкой в 0.15 м и некоторым углом дрейфа. При вычислении истинного угла дрейфа следует учитывать разный масштаб по осям x и y на рисунке 9 [9].

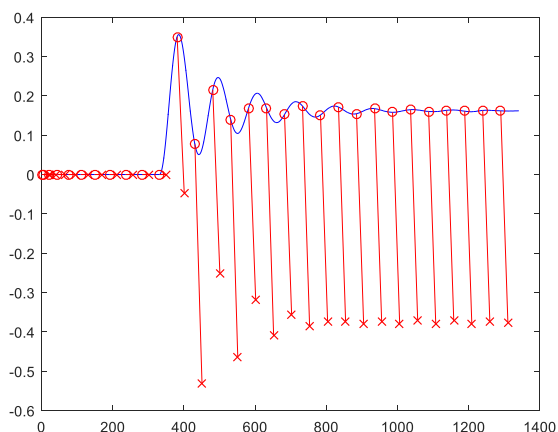


Рис. 9. Движение судна при боковом ветре

С увеличением скорости и изменением направления ветра качественные показатели могут ухудшаться (меняется частота срабатываний приводов гребных колес и величина статической ошибки, хотя ее

величина находится в допустимых для практики пределах). Синтезированные алгоритмы позволяют судну двигаться по заданной траектории при скоростях ветра до $V_b = 15$ м/с. При этом увеличивается частота срабатываний приводов гребных колес, причем при малых скоростях ветра подработка осуществляется одним колесом, при больших скоростях ветра удержание судна на курсе обеспечивается двумя колесами. Следует отметить, что в разработанной системе управления может быть представлен широкий спектр алгоритмов (отдельных программных модулей), причем переход от одного алгоритма к другому не требует никакой аппаратной перестройки КСКУ. Алгоритмы могут модернизироваться в процессе эксплуатации судна, что позволяет в процессе ввода судна в эксплуатацию существенно расширять круг автоматизируемых судовых технологических процессов. В КСКУ легко интегрируются новые функциональные модули. К ним, например, относятся ультразвуковые датчики измерения осадки судна (входят в систему мониторинга балластных цистерн). Реализация автоматической швартовки судна также требует установки на судне специализированных датчиков, позволяющих измерять расстояние до причальной стенки и окружающих объектов по периметру судна (10 пар лазерных дальномеров с фиксированным углом между лучами) и ориентацию корпуса судна в пространстве. Определения положения корпуса в пространстве производится на основе комплексной обработки данных акселерометра/гороскопа и навигационных модулей, работающих с 3-4 спутниковыми навигационными системами [10]. Применяемые датчики обмениваются информацией по полевым шинам (интерфейс RS-485) с использованием протокола NMEA с ближайшим контроллером.

Выводы.

Можно выделить ряд преимуществ разработанной КСКУ:

- широкие возможности по модернизации и развитию алгоритмов управления как отдельными подсистемами и судовыми технологическими процессами, так и судном в целом. Включение новых алгоритмов или модернизация используемых может производиться в процессе эксплуатации судна по мере возникновения ситуаций, требующих коррекции алгоритмического обеспечения. Обновление программных модулей не требует изменения структуры системы или изменений аппаратной части системы;

- обеспечение экономии топлива за счет автоматизации процессов управления. Используемые алгоритмы обеспечивают движение судна, например по заданной траектории, при более низкой интенсивности включений приводов гребных колес, чем при ручном управлении, особенно в условиях внешних воздействий;

- вовлечение в процесс автоматизации широкого круга агрегатов, механизмов и судовых технологических процессов поднимает на новый качественный уровень обработку полученной информации, ее обобщение и представление оператору в систематизированном виде (мнемосхемы технологических цепочек, выделение

приоритетов по уровню важности в сложившихся обстоятельствах, группировка по функциональному назначению и т.п.), что обеспечивает принятие им обоснованных управленческих решений;

– значительное снижение объема монтажных работ и кабельной продукции за счет использования распределенной структуры КСКУ (размещение контроллеров в зонах сосредоточения измеряемых параметров и узлов управления, организация каналов связи на нижнем уровне по полевым шинам, на верхнем уровне – по сети Ethernet);

– значительное конструктивное упрощение пультов управления за счет использования сенсорных панелей, совмещающих в себе функции отображения информации в виде наглядных и понятных мнемосхем и функции управляющих

органов. Отпадает необходимость в большом количестве сигнальной аппаратуры (стрелочных приборов, сигнальных ламп и шкал, переключателей, потенциометров и т.п.);

– обеспечение высокой надежности и ремонтпригодности КСКУ за счет использование модульной конструкции и современной элементной базы (контроллеры и модули Fastwel), со встроенной многоуровневой системой диагностики. В КСКУ контролируются все уровни системы: датчик/исполнительное устройство – канал связи с измерительным/управляющим модулем – модуль измерения/управления – контроллер – канал связи с компьютерами – компьютеры. Ремонтпригодность обеспечивается возможностью оперативной замены модулей.

Литература

1. Бурда Е.М., Галкин Д.Н., Корнев А.Б. Инновационная гребная электрическая установка пассажирского колесного судна. //Речной транспорт (XXI век). 2016. - №1(77) - с 24-26.
2. Галкин Д.А., Малый Ю.А. От «Суры» к «Золотому кольцу». //Речной транспорт (XXI век). 2015. – №2(73). – с. 32-33.
3. Хватов О.С., Бурда Е.М., Тарпанов И.А., Кштальный Н.И. Вариант единой электростанции колесного судна с электродвижением. // Вестник Астраханского государственного технического университета. - Серия: Морская техника и технология -№2, 2016г. - с.102-108.
4. Бурда Е.М., Попов С.В. Автоматическое регулирование темпа разгона гребных электродвигателей колесного судна. //Сборник Великие реки -2019, Труды 21 международного научно-промышленного форума, 2019г., с.51.
5. Галкин Д.Н., Итальянцев С.А., Плющаев В.И. Компьютеризованная система управления пассажирским колесным теплоходом. //Речной транспорт (XXI век). Москва. № 6. 2014 – с.29-31.
6. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В. И. Математическая модель судна с колесным движительно-рулевым комплексом «Золотое кольцо» // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 3. – С. 36–49.
7. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Управление судном с колесным движительно-рулевым комплексом при выполнении швартовых операций. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2017. – №4. – С.21-30.
8. Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Швартовка судна с колесным движительно-рулевым комплексом. // Морские интеллектуальные технологии. 2019.– 3(45), т.3, с. 191–195.
9. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Адаптивный алгоритм удержания судна с колесным двигателем на курсе. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 43. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – С.48-55.
10. Базылев А.В., Бычков В.Я., Перевезенцев, С.В., Плющаев В.И. Аппаратно-программный комплекс для автоматической швартовки судов. Научные проблемы водного транспорта, 2020, №64. - с.195-206.

References

1. Burda E.M., Galkin D.N., Kornev A.B. Innovatsionnaya grebnaya elektricheskaya ustanovka passazhirskogo kolesnogo sudna. [The innovative rowing electrical unit of passenger paddle ship]. Rechnoy transport (XXI vek). 2016. - №1(77) - s 24-26.
2. Galkin D.A., Malyu Yu.A. Ot «Sury» k «Zolotomu kol'tsu». [From the motor ship "Sura" to the cruise ship "Golden Ring"]. Rechnoy transport (XXI vek). 2015. №2(73). s. 32-33.
3. Khatov O.S., Burda E.M., Tarpanov I.A., Kshaltal'nyy N.I. Variant edinoy elektrostantsii kolesnogo sudna s elektrodvizheniem. [A variant of a single power plant for a wheeled ship with electric propulsion]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya №2, 2016g. s.102-108.
4. Burda E.M., Popov S.V. Avtomaticheskoe regulirovanie tempa razgona grebnykh elektrodvigatelay kolesnogo sudna. [Automatic regulation of the acceleration rate of the rowing electric motors of a wheeled vessel]. Sbornik Velikie reki -2019, Trudy 21 mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, 2019g., s.51.
5. Galkin D.N., Ital'yantsev S.A., Plyushchaev V.I. Komp'yuterizovannaya sistema upravleniya passazhirskim kolesnym teplokhodom. [Computer-aided control system of passenger wheeled ship]. Rechnoy transport (XXI vek). Moskva. № 6. 2014 s.29-31.
6. Bychkov V.Ya., Grosheva L.S., Plyushchaev V. I. Matematicheskaya model' sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom «Zolotoe kol'tso» [Mathematical model of the vessel with wheeled propulsion-steering complex "Golden ring"]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2018. № 3. s. 36–49.
7. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Upravlenie sudnom s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom pri vypolnenii shvartovykh operatsiy. [Handling a ship with wheeled propulsion-steering complex while performing mooring

- operations]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2017. №4. s.21-30.
8. Grosheva L.S., Merzlyakov V.I., Plyushchaev V.I. Shvartovka sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom. [Mooring of a ship with wheel propulsion steering complex]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. 3(45), t.3, s. 191–195.
 9. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Adaptivnyy algoritm uderzhaniya sudna s kolesnym dvizhitelem na kurse. [The adaptive algorithm of keeping the vessel with the paddle wheels on the course]. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. Vypusk 43. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2015. s.48-55.
 10. Bazylev A.V., Bychkov V.Ya., Perevezentsev, S.V., Plyushchaev V.I. Apparato-programmnyy kompleks dlya avtomaticheskoy shvartovki sudov. [Hardware and software complex for automatic mooring of ships]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, 2020, №64. s.195-206.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Мордкович Бурда, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта», Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail Burda1951@mail.ru

Сергей Владимирович Перевезенцев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail: sergpsv70@gmail.com

Валерий Иванович Плющаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail: vip3345@yandex.ru

Evgeny M. Burda, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail Burda1951@mail.ru

Sergey V. Perevezentsev, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail sergpsv70@gmail.com

Valery.I. Plyushchaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: vip3345@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.09.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 681.3 :656.61.01(075.8)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.050>

Оптимизация транспортно-технологических процессов методом динамического программирования

А.П. Шрамко¹, e-mail: ocenka-shramko@mail.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация: С ростом экономического потенциала страны, реализацией масштабных инфраструктурных проектов актуализируются проблемы оптимизации многоуровневых и многоэтапных управленческих решений на основе методов математического моделирования. В работе исследуются оптимизационные подходы к моделированию региональных и локальных транспортных систем с использованием принципов динамического программирования при соотношении объемов грузопотоков провозному потенциалу транспортных системы с определением оптимального маршрута движения потока. Принимая во внимание, что транспорт не создает новых вещественных ценностей, а только их перемещает в пространстве предлагаемые подходы организации, планирования и управления создадут условия для получения существенного эффекта на основе оптимизации прогнозирования и совершенствования организационного механизма управления транспортом – технологическими процессами. Излагаются общие принципы построения модели динамического программирования применительно к региональной и локальной транспортной системам, при распределении ресурсов между различными объектами, их использования по уточненным периодам времени, для получения максимального эффекта от принятого способа распределения. Обосновано прикладное использование моделей динамического программирования, при организации и исследовании, несмотря на то, что базовые параметры ограничены размерностью переменной состояния системы. Вместе с тем данное обстоятельство не снижает ценности и практической значимости метода, а позволяет провести границу между областями динамического программирования и другими математическими методами, с обоснованием преимуществ и прикладного универсального значения. Предлагается методический инструментарий повышения эффективности региональной и локальных транспортных систем при тенденции к общему увеличению грузооборота.

Ключевые слова: транспортная система, динамическое программирование, моделирование, международный транзит, региональная транспортная система, технологический процесс, грузопоток, комплекс, материальный поток, параметрическая модель, прогнозирование.

Optimization of transport and technological processes by the method dynamic programming

Alexander P. Shramko¹, e-mail: ocenka-shramko@mail.ru

¹ State maritime university. adm. F.F. Ushakov, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract: With the growth of the economic potential of the country, the implementation of large-scale infrastructure projects is updated to optimize multi-level and multi-step management solutions based on mathematical modeling methods. The paper explores optimization approaches to modeling regional and local transport systems using the principles of dynamic programming in relation to the volume of freight traffic volumetric potential of transport systems with the definition of the optimal flow route. Taking into account that transport does not create new real values, but only they move them in space. The proposed approaches of the organization, planning and management will create conditions for obtaining a significant effect on the basis of optimizing forecasting and improving the organizational mechanism of transport management - technological processes.

General principles for building a dynamic programming model in relation to regional and local transport systems, when distributing resources between different objects, their use on refined periods of time, to obtain a maximum effect from the received distribution method. Applied use of models of dynamic programming, with the organization and study, despite the fact that the basic parameters are limited to the dimension of the system status variable. At the same time, this circumstance does not reduce the value and practical significance of the method A, makes it possible to carry out the border between the areas of dynamic programming and other mathematical methods, with the rationale for the advantages and applied universal value. A methodological toolkit of increasing the efficiency of regional and local transport systems with a tendency to a general increase in cargo turnover is proposed.

Keywords: transport system, dynamic programming, modeling, international transit, regional transport system, technological process, cargo traffic, complex, material flow, parametric model, prediction

Введение

Эффективное функционирование транспортной системы базируется на сбалансированности провозного и пропускного потенциала сети с потребностями внутреннего и международного транзита. Транспорт - обслуживающая отрасль материального производства, на основе которой происходит системный кругооборот производительного капитала и стабильное функционирование промышленного производства. В

традиционном плане транспортные системы рассматриваются, как детерминированные и стохастические.

В настоящее время сложилась ситуация, когда функционирование транспортного комплекса происходит в условиях нестабильного грузопотока и других переменных отрицательно влияющие на прогнозные компоненты. Неравномерность роста объемов перевозок должна компенсироваться постоянным развитием провозного потенциала инфраструктуры, потребным количеством

подвижного состава и вагонного парка. Эффективным методом прогнозирования и проектирования транспортных систем является динамическое программирование (ДП), которое применяется при перспективном прогнозировании, планировании и поэтапной модернизации региональной и локальных транспортной системы.

Вычислительная схема ДП усложняется с ростом числа ограничений, которые вводятся в модель новыми параметрами состояний.

Базовой идеей, определяющей развитие теории управления, остаётся проблема оптимизации. Задача оптимального управления базируется на классическом вариационном исчислении, в развитии принципа максимума, позволяющий задачу оптимального управления свести к некоторой специальной математической задаче - (динамическому программированию) на основе множителей Лагранжа.

Динамическое программирование находит широкое применение в области управления. В основу метода положен принцип оптимальности сформулированный Р. Беллманом для широкого круга систем, будущее поведение которых полностью определяется их состоянием в настоящее время. Поэтому их состояние не зависит от характера предыстории, т.е. поведением системы в

прошлом, исходя и предположения, что система находится в текущий момент в данном состоянии. В соответствии с этим принцип оптимальности предполагает: оптимальная стратегия, не зависящая от предыдущей истории системы, определяется лишь её состоянием в рассматриваемый период времени [1].

Основная часть

Грузопоток характеризуется вектором: пункт отправления, пункт назначения, класс, род, груза, срок доставки, время отправления.

В свою очередь, перевозка грузов связана: со схемой (картограммой) грузопотока; скоростью движения подвижного состава; емкостью (грузоподъемностью) подвижного состава (чем больше грузоподъемность единицы подвижного состава, тем меньше себестоимость транспортирования, но больше издержек, за счёт простоев. В основе устойчивого грузопотока лежит организация взаимодействия видов транспорта, грузоперерабатывающий потенциал терминалов, оптимальная грузоподъемность единицы подвижного состава. На (рис. 1). представлена принципиальная схема функционирования региональной транспортной системы.

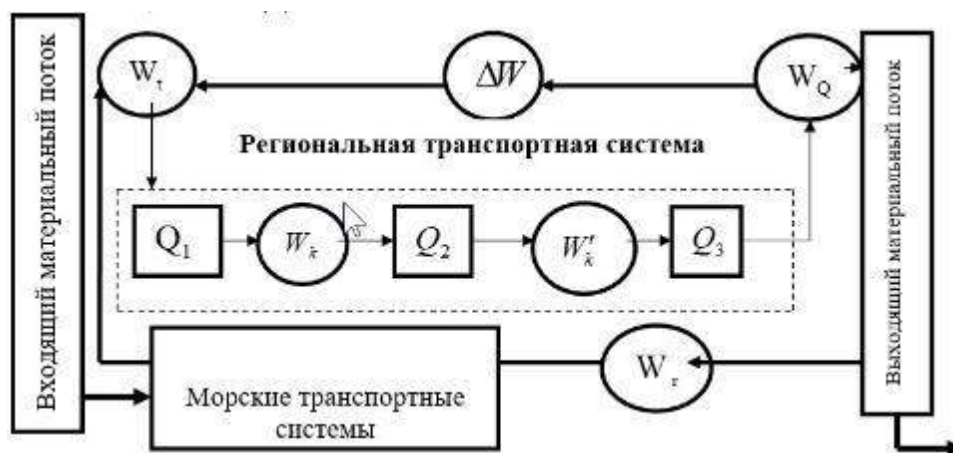


Рис. 1. Принципиальная схема функционирования региональной транспортной системы в составе международных транспортных коммуникаций:

где W_t - грузопоток транспортного комплекса; W_Q - транспортная продукция; W_T - потребности грузополучателя; W'_k - прогнозная провозная возможность транспортного комплекса; W_k - фактическая провозная способность, транспортной системы, Q_1 - оператор морского транспорта; Q_2 - оператор железнодорожного транспорта; Q_3 - оператор автомобильного транспорта; ΔW - увеличение (сокращение) грузопотока.

Транспортный комплекс является динамической системой, поэтому все переменные величины в уравнениях являются функциями от времени. Любую конечную провозную возможность W_k следует рассматривать в некоторый определенный момент времени t .

Вход - грузопоток транспортного комплекса - также изменяется во времени, поэтому возможны такие состояния системы, когда значения грузопотока будут значительно отличаться от провозной возможности транспортного комплекса,

что может привести к отказам. В этих условиях особый интерес представляет установившийся режим работы, т.е. устойчивая работа транспортного комплекса во всем диапазоне изменения грузопотока. Для этого случая необходимо знать величину и закономерности изменения грузопотока транспортного комплекса и его провозной возможности. Принципиальная схема региональной транспортной системы Азово-Черноморского бассейна Российской Федерации представлена на (рис.2).

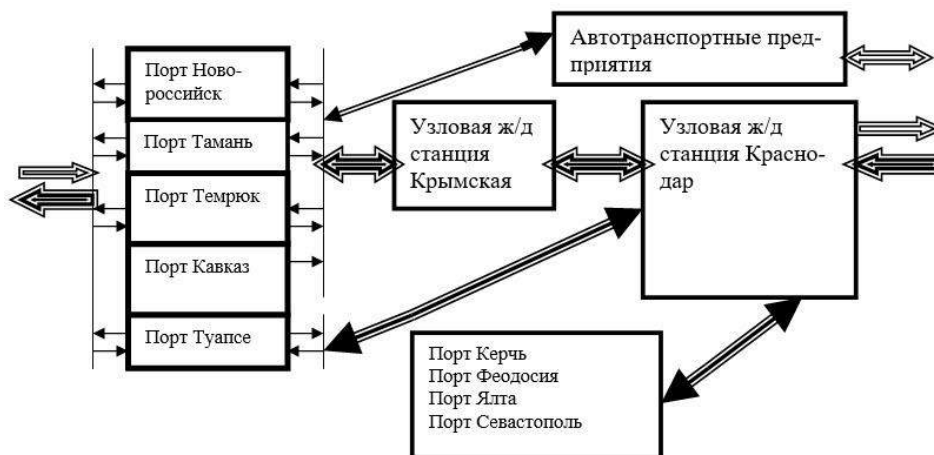


Рис. 2. Принципиальная схема региональной транспортной системы Азов-Черноморского бассейна Российской Федерации [6].

«Развитие международных отношений выявило целый ряд дополнительных загруженностей в виде различия технических норм по подвижному составу, транспортным путям, габаритам и массе грузов, своеобразия национальных нормативно-правовых требований, что создает большие задержки при перевалке грузов с одного вида транспорта на другой при пересечении границ и т. п., тем самым увеличивая риски и стоимость» [1].

Транспортный комплекс Азово-Черноморского бассейна РФ представляет собой совокупность различных видов транспорта, действующих на территории региона. Его развитие обусловлено особенностями хозяйственного комплекса, отраслевой и территориальной структурой производства, местом региона в постсоветском территориальном разделении труда, географическим положением и рядом других условий и факторов [2,3].

Потребные провозные возможности транспортного комплекса определяются ростом объема перевозок. Этот параметр может быть как постоянным, так и переменным. Функция потребности в перевозках может быть выражена в виде:

$$Q(t) = Q_{(t-1)} + aA_t + a_1A_{t-1} + a_2A_{t-2} \quad (1)$$

где $Q(t)$ - прогнозируемый объем перевозки в период t ; $Q_{(t-1)}$ - объем перевозок в предшествующий период; a, a_1, a_2 - постоянные коэффициенты, положительно или отрицательно влияющие на транзит; A_t - число единиц транспортных средств (железнодорожного, автомобильного и морского транспорта) в транспортной системе за период t .

Потребности в транзите региона и его провозных возможностей могут быть выражены:

$$Q = F(A); \dots W_k = \varphi(A) \quad (2)$$

Рассматривая транспортную систему региона с позиций динамического программирования, как выбора оптимального плана реализации многоэтапных действий, где

в общем виде постановка задачи ДП сводится к следующему.

При наличии функционирующей транспортной системы (транспортный процесс), состоящая, (организационно и технологически) из M шагов (этапов). На каждом шаге осуществляется распределение и перераспределение ресурсов, с целью улучшения ее результата в целом. Эти распределения в ДП называются управлениями операцией и обозначаются буквой u . Эффективность операции в целом оценивается тем же показателем, что и эффективность ее управления $W(u)$. При этом эффективность

управления $W(u)$ зависит от всей совокупности управлений на каждом шаге операции:

$$W = W(u) = W(u_1, u_2, \dots, u_m).$$

Управление, при котором показатель W достигает максимума, называется оптимальным управлением.

Оптимальное управление многошаговым процессом состоит из совокупности оптимальных управлений на каждом этапе:

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$$

В большинстве практических задач принимается показатель эффективности операций в целом W представляет собой сумму эффективности действий

на всех этапах (шагах), операций: $W = \sum_{i=1}^m \omega_i$ где:

ω_i - эффективность операции на i -м шаге. При этом в случае оптимального управления системой:

$$W = \max \sum_{i=1}^m \omega_i$$

Сущность решения задач ДП заключается в следующем:

- оптимизация производится методом последовательных приближений (итераций) в два круга; вначале от последнего шага операции к первому, а затем, наоборот, от первого к последнему;

- на первом круге, идя от последующих шагов к предыдущим, находится так называемое условное оптимальное решение. Условное оптимальное управление выбирается таким, чтобы все предыдущие шаги обеспечивали максимальную эффективность последующего шага. Иными словами, на каждом шаге определяется такое управление, которое обеспечивает оптимальное продолжение операции. Этот принцип выбора управления называется принципом оптимальности; - так продолжается до первого шага. Но поскольку первый шаг не имеет предыдущего, то полученное для него условное оптимальное управление «теряет свой условный характер» и становится просто оптимальным управленческим решением.

Второй круг оптимизации начинается с шага, для которого оптимальное управление известно. Имея для всех шагов после него условные оптимальные управления определяются решения для каждого последующего шага [4].

На рис. 3 представлена динамическая модель соотношения грузопотоков и провозной способности транспортного комплекса региона.

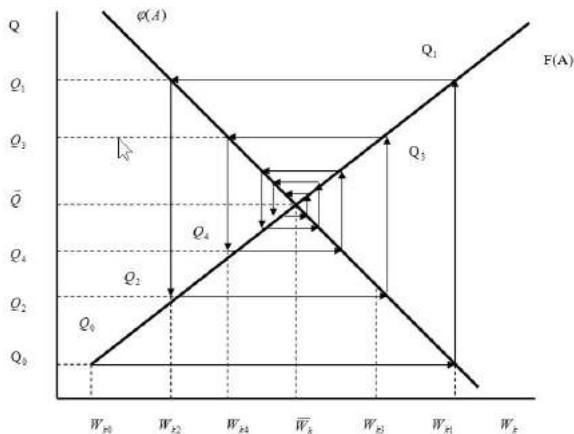


Рис. 3. Динамическая модель соотношения грузопотоков и провозной способности транспортного комплекса региона.

Прямая $\varphi(A)$ отражает возможности и потребности в перевозках грузов определяемые $F(A)$. Действия динамической модели (рис. 3) соответствует кривым изменениям провозной способности $\varphi(A)$ и потребности в перевозках определяемая $F(A)$. Положение равновесия соответствует точке пересечения \bar{Q} и \bar{W}_k . В начальный период провозной потенциал составляет W_{k0} и перевозится Q_0 объём груза, соответствующее точке Q_0 на кривой $F(A)$. При недостаточных провозной способности подвижного состава, обеспечивающего транзит, спрос превышает предложение. Этим объясняется тем, что система с обратной связью, какой является транспортный комплекс региона, как динамическая система, характеризуется следующими параметрами: структура - состав транспортного комплекса; задержки - время, необходимое для сбора

информации и передачи её различным частям системы; управление - отдельными звеньям системы в общем информационном пространстве.

Второй период провозные способности составят W_{k1} которые перевезут Q_1 грузов. От точки Q_1 на кривой $F(A)$. движение пойдет по горизонтали до пересечения с кривой $\varphi(A)$. Вертикаль, опущенная из этой точки, покажет потребные провозные возможности следующего времени интервала, а на ось ординат - объём груза, перевозимого в следующий период. Относительная провозная возможность и объём перевозимого груза являются соответственно координатами точек Q_1, Q_2, Q_3 на кривой, которые тяготеют к точке с координатами \bar{Q}, \bar{W}_k .

Расположение точек Q_1, Q_2, Q_3 , зависит от характера зависимостей $\varphi(A)$ и $F(A)$. Колебания могут быть затухающими, взрывными и регулярными. Если функции $F(A)$. и $\varphi(A)$ заданы уравнениями :

$$F(A) = Q_0 + aA_t; \quad \varphi(A) = W_{k0} + bA_t \quad (3)$$

(где a и b - постоянные коэффициенты; W_{k0} - провозные возможности транспортного комплекса в предшествующий период), то соответствие провозной способности объёму перевозок будет выражено уравнениями

$$\bar{Q} = Q_0 + a\bar{A}_t = W_{k0} + b\bar{A}_t; \quad (4)$$

$$\bar{A}_t = \frac{Q_0 - W_{k0}}{b - a} \quad (5)$$

В случае, когда происходит отставание провозной способности подвижного состава от потребности в перевозке уравнение будет иметь вид:

$$Q_t = Q_0 + aA_{t-1} = W_{k0} + bA_t \quad (6)$$

Вычтя из уравнения (3) уравнение (4) получим

$$\Delta A_t = A_t - \bar{A} \quad (5) \text{ и получим } a\Delta A_{t-1} = bA_t$$

Уравнение описывает отклонения от уровня равновесия. Если обозначить $C = a/b$ и поставить его в это уравнение, то получим $\Delta A_t = C\Delta A_{t-1}$.

Если известно значение A_0 в момент t_0 то

$$\Delta A = A_0 C^t; \dots A = A + (A_0 - A)C_t; \dots \Delta A = A_0 C^t$$

В этом случае $C = \frac{(+a)}{(-b)}$; $\Delta A_t = A_0 (-1)^t C^t$ и

следовательно равно значениям $A_0 C; \dots A_0 C^2; \dots A_0 C^3$, так, что ΔA_t приобретает поочередно то положительное, то отрицательное значения.

Анализ показывает, что возможны следующие случаи:

1) $a > |b|$, угол наклона $F(A)$ к оси OA больше, чем угол наклона $\varphi(A)$. В случае $C > 1$ и ряд

последовательных значений ΔA_i являются бесконечно возрастающими по абсолютной величине ($\Delta \rightarrow \infty$), имеют место взрывные колебания;

2) $a = |-b|$, т.е. углы наклона $F(A)$ и $\varphi(A)$ равны.

В этом случае $C = 1$ и ряд значений ΔA_i будет состоять из чередований $(A - \Delta A_i)$ и $(A + \Delta A_i)$, т.е. ΔA_i будет больше, то меньше W_k на одну и ту же величину;

3) $a < |-b|$, т.е. угол наклона $\varphi(A)$ больше, чем $F(A)$. В этом случае $C < 1$ и последовательные ΔA_i уменьшаются по абсолютной величине. Колебания затухающие, стремящиеся к уровню равновесия. Чем больше β по отношению к α , т.е. чем круче $\varphi(A)$ по сравнению с $F(A)$, тем скорее будут затухать неравномерности в поступлении грузов в систему.

Методом динамического программирования могут решаться и задачи, приводящие к сетевым транспортным моделям.

Вместе с тем предлагаемый инструментарий применим к исследованию и оптимизации локальных транспортных систем, таких как порт, судоходная компания, транспортный узел

Исходя из положения, что методом динамического программирования является многоэтапным. Этапы выбора играют роль параметра, аналогичного времени. При движении от нулевого (начального) этапа к последнему (конечному) состоянию процесса описывает множество траекторий движения в пространстве в пространстве этап — состояние. Одна из них оптимальна по принятому критерию оптимизации. Каждая траектория на произвольном промежуточном этапе разбивается на две — начального и конечного движения. Начальная траектория соответствует движению от начального до промежуточного этапа, а конечная — из промежуточного в конечный этап. Выбор оптимальной траектории методом динамического программирования основан на принципе оптимальности Беллмана.

Согласно которому для любого промежуточного этапа и произвольного состояния на нем оптимальная траектория конечного движения единственна для всех начальных траекторий. [5].

В соответствии с этим принципом каждое состояние нового промежуточного этапа имеет свою единственную оптимальную траекторию конечного движения отсюда следует, что оптимальные траектории не пересекаются (в отличие от неоптимальных). Они могут сливаться, но пересекаться не могут. Этим свойством определяется лапласовский детерминизм оптимальных траекторий Беллмана, устанавливающий связь между произвольным состоянием промежуточного этапа и конечным.

Поиск оптимальных конечных траекторий движения для всех состояний очередного промежуточного этапа выполняют по рекуррентным

уравнениям Беллмана, начиная от последнего этапа:

$$F_k = F(y_k, F_{k+1}), \quad Z_k = \text{opt}(y_k, Z_{k+1}) \quad (7)$$

$$x_{k+1} = G(x_k, u_k), \quad y_k = N(x_k, u_k) \quad (8)$$

$$Z_k = z(x_k), \quad Z_{k+1} = Z(x_{k+1}), \quad \forall k \in [0, N], \quad (9)$$

где k — номер этапа;

$0, N$ — начальный и конечный этапы;

x_k, u_k — состояние и управление на этапе k ;

y_k — локальный результат движения от этапа k к этапу $k + 1$;

F_k — совокупный результат конечного движения из этапа k ;

Z_k — совокупный результат по оптимальной траектории конечного движения состояния x_k этапа k .

Если рассмотрим аддитивный (суммируем), то рекуррентные уравнения Беллмана будут иметь вид:

$$F_k = y_k + F_{k+1}, \quad Z_k = \text{opt}(y_k + Z_{k+1}). \quad (10)$$

Рассмотрим особенности метода ДП на примере оптимизации единого технологического процесса специализированного участка порта.

Груз на терминал завозится в судах, отправляется в вагонах, перегружается механизированными линиями либо по прямому варианту, либо через склад и может храниться на складе. Технологическую линия развивает производительность P_m т/ч и имеет фонд оперативного времени t_s ч/сут.

Технологическая линия (ТЛ) перегружает V_T грузов за эксплуатационный период t сут. Необходимо определить оптимальный режим работы ТЛ по критерию затрат на содержание флота, вагонов, причалов, рейдов, складов и механизированных линий.

Режим единого технологического процесса задается распределением механизированной линии на обработку судов x_1 , вагонов x_2 на работу по прямому варианту x_m . Затраты участка зависят от этого распределения.

Пользуясь понятием предельного продукта можно истолковать следующим образом: при данных издержках продукция морского флота $Z = Z(x_1, x_2, x_n)$ максимальная в том случае, если предельные продукты обоих факторов равны друг другу. Этот вывод очевиден. Действительно, все финансовые и материальные ресурсы можно использовать на модернизацию и развитие первого или второго фактора. Вместе с тем целесообразно приобрести и направить усилия на тот фактор производства, предельный продукт которого имеет большее значение, отсюда вытекает вывод, что производственная функция достигает максимума в

том случае, если предельные продукты обоих факторов имеют тенденцию к увеличению [6]. Определим основные зависимости приведённых издержек..
Обработка флота. Здесь необходимо выделить затраты на содержание судов, рейда и причалов порта, используя зависимости:

$$R = \frac{G_Z \rho}{G_Z \rho + E_n (1 - \rho)}, \quad E_n = G_C n \quad (11)$$

С учетом загрузки стационарной очереди судов:

$$G_k = \frac{\rho R G_V}{1 - \rho} = \frac{\rho^2}{1 - \rho} * \frac{G_Z G_V}{G_Z \rho + E_n (1 - \rho)}, \quad (12)$$

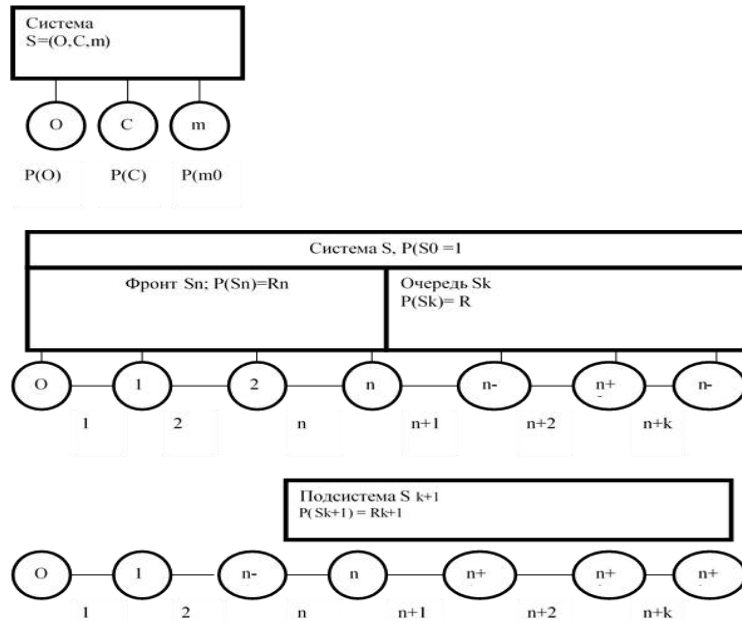


Рис. 4. Параметрическая модель обслуживания судов в порту

Рассмотрим последовательность подсистемы S, S_{k+1}, S_k и по зависимости

$$P(n) = P(n)R_n = \frac{G_Z}{G_C} * \frac{\bar{y}_n R_n}{n^2} = \frac{G_Z}{G_C} \left(\frac{y_n}{n^2} - \frac{R_S}{n} \right) \quad (13)$$

для всех из них определим вероятность предельного состояния очереди:

$$P(n+k) = \frac{G_Z}{G_C} \left(\frac{y_k + y_n}{(n+k)^2} = \frac{y_k + R}{(k+1)^2} = \frac{y_k}{k^2} \right) \quad (14)$$

где y_n, y_k - среднее состояние фронта в очереди;

$y_k + y_n$ - среднее состояние системы S ;

$y_k + R$ и y_k - среднее состояние подсистемы

S_{k+1} и S_k ;

$n+k$ - предельное состояние системы S ;

$k+1$ - предельное состояние подсистемы S_{k+1} ;

k - предельное состояние очереди S_k ;

Обработка флота. Необходимо определить издержки на содержание судов, рейда и причалов

Построим параметрическую модель рассматриваемой системы (рис. 4), в которой фронт обработки судов равен n , а максимальная очередь - k . Система имеет $n+k+1$ состояний. Вероятность всех ее состояний равно единице., как вероятность достоверного события (в каком-то состоянии система всегда находится), $P(S) = 1$.

Выделим следующие подсистемы: S_n - очереди нет; S_s - есть очередь. S_k - фронт обработки судов полностью занят; S_{n+1} - на фронте обработки судов свободно более одного места.

порта используя зависимости (14,15) и исходя из предположения, что..

$$Z'_i = S'_i n_i \rho_i + S'_i \frac{k^2}{2k_i + n_i} \rho_i + S'_k + S'_n n_i; \quad (15)$$

$$\frac{k^2}{2k_i + 1} = \frac{\rho_i}{1 - \rho_i} C'_V \quad (16)$$

где n_i, ρ_i, k_i - соответственно фронт обработки судов, его нагрузка и максимальная очередь;

S'_i, S'_k, S'_n — расходные ставки, р./сут. на содержание судна, места на рейде, причала;

C'_V — приведенная партия судов.

Суммируя затраты по судоходной компании, находим

$$Z'_i = S'_i \frac{(n_i + k_i)^2}{2k_i + n_i} \rho_i + S'_k k_i + S'_n n_i \quad (17)$$

Пусть u_i — концентрация ТЛ линий на причале, m среднее количество работающих линий, тогда

нагрузка и число причалов определяются через них как:

$$\rho_1 = \frac{m}{x_1}, \quad n_1 = \frac{x_1}{u_1}, \quad m = \frac{Q}{P_m t_s}, \quad Q = \frac{V}{t} \quad (18)$$

где Q - среднесуточная интенсивность завоза груза.

Учитывая принятые обозначения получаем следующее выражение:

$$C_1 = \frac{\rho_1}{1 - \rho_1} C'_V = \frac{m}{x_1 - m} C'_V = \frac{k_1^2}{2k + 1}; \quad (19)$$

$$k_1 = C_1 + \sqrt{C_2(C_2 + 1)}; \quad (20)$$

$$Z'_1 = S'_1 \frac{(n_1 + k_1)^2}{2k_1 + n_1} * \frac{m}{x_1} + S'_k k_1 + S'_n n_1 \quad (21)$$

Обработка вагонов. Режим их обслуживания задается аналогичными зависимостями:

$$C_2 = \frac{\rho_2}{1 - \rho_2} C''_V = \frac{m}{x_2 - m} C''_V = \frac{k_2^2}{2k + 1}; \quad (22)$$

$$k_2 = C_2 + \sqrt{C_2(C_2 + 1)}; \quad (23)$$

$$Z''_1 = S''_1 \frac{(n_2 + k_2)^2}{2k_2 + n_2} * \frac{m}{x_2} + S''_k k_2 + S''_n n_2, \quad (24)$$

$$n_2 = \frac{x_2}{u_2}, \quad (25)$$

где S''_1, S''_k, S''_n - расходные ставки, р./сут. на содержание судна, места на рейде, причала;

C''_V - приведенная партия вагонов

k_2, n_2 - очередь и фронт обработки вагонов;

u_2 - концентрация линии на вагон.

Средства порта. К ним относятся склады и ТЛ линии. Пусть G_Z - партия груза; грузоподъемность склада будет равна:

$$E = G_Z(x + k);$$

где x - число линий (фронт работ)

k - вместимость дополнительного склада, определяемая из уравнений

$$\frac{k^2}{2k + 1} + \frac{\rho}{1 - \rho} C_V, \quad x_s = \frac{k}{1 - \rho} \quad (26)$$

где x_s - оборот максимального периода накопления очереди (измеряется партиями G_Z)

ρ - максимальная нагрузка;

C_V - коэффициент приведенной коносаментной партии груза.

Исключив нагрузку ρ , получим

$$\frac{k^3}{(x_s - k) * (2k + 1)} = C_V \quad (27)$$

Решение относительно k получим в виде повторно цикла

$$1. C = 2C_V.$$

$$2. k = \frac{2Cx_s}{C + \sqrt{C(C + 4x_s)}}$$

$$3. C = C_V + \sqrt{C_V(C_V + k/(x_s - k))}$$

При этом Операции 2 и 3 этого цикла повторяются до необходимой точности решения. Практически достаточно одного - двух повторений. Общее количество ТЛ зависит от распределения объемов по вариантам работ.

$$x = (I - B) * (x_1 + x_2) + Bx_m \quad (28)$$

где B - доля груза, перегружаемого по прямому варианту;

x_m - число линий, работающих по прямому варианту.

Доля прямого варианта в грузообороте определяется по формуле

$$B = \rho_1 \rho_2 \frac{P_m t_s x_m}{Q} = \frac{mx_m}{x_1 x_2} \quad (29)$$

Издержки на содержание основных производственных фондов порта выражается формулой

$$Z_n = S_e(x + k) + S_m x \quad (30)$$

где S_e, S_m - расходные ставки на содержание склада

с грузоподъемностью G_Z и одной ТЛ р./сут.

Общие издержки ТЛ равны сумме рассмотренных

$$Z = Z'_1(x_1) + Z''_1(x_2) + Z_n(x_1, x_2, x_m) \quad (31)$$

Итоговый критерий равен сумме частных результатов поэтому его оптимизацию можно выполнить применяя метод ДП. При этом выделяя четыре этапа. На втором этапе задаем режим работы средств порта параметром x_m на третьем - режим обработки вагонов параметром x_2 на четвертом - режим обработки судов параметром x_1 . На первом выбираем оптимальный режим. Решение начинается с последнего (четвертого) по рекуррентным уравнениям Беллмана, а именно:

$$\text{Этап 4. } (k = 4) \quad x_k = x_1, y_k = Z'_1(x_1), \\ F_k = y_k, Z_k = F_k$$

$$\text{Этап 3. } (k = 3) \quad x_k = x_1, y_k = Z''_1(x_2), \\ F_k = y_k, Z_k = F_{k+1}, Z = opt..(y_k + Z_{k+1})$$

Этап 2. ($k = 2$) $x_k = x_1 + x_2 + x_m$,
 $y_k = Z_n(x_1, x_2, x_n)$, $F_k = y_k + F_{k+1}$,
 $t_k = opt(y_k + Z_{k+1})$
 Этап 1. ($k = 1$) $y_k = 0$, $F_k = F_{k+1}$,
 $Z_k = opt(Z_{k+1})$

В рассмотренной схеме состояние процесса на этапах задается частичными схемами x_k . На этапе 4 рассчитывают все возможные результаты Z_n по обработке флота, варьируя число ТЛ x_1 , на обработке судов. Для каждого x_1 имеем один конечный результат. Поэтому он оптимален. На этапе 3 рассматриваются частичные суммы $x_k = x_1 + x_2$ с множеством разбиений между x_1, x_2 . Следовательно, каждый результат x_k может быть получен многими способами. Среди них есть один — оптимальный. Он определяет конечную траекторию состояния x_k . Здесь частичная сумма издержек измеряет совместные расходы на содержание флота и подвижного железнодорожного состава. Каждый из вариантов задает конкретный режим обработки судов и подвижного железнодорожного транспорта с издержками $Z'_i(x_1), Z''_i(x_2)$ среди них есть с наименьшими суммарными издержками

$Z_k = min(Z''_i(x_2) + Z'_i(x_1), \forall x_1)$ (32)
 На этапе два анализируются частичные результаты финансовых итогов.

$$x_k = x_1 + x_2 + x_m = x_m + (x_1 + x_2) = x_m + (x_1 = x_2) = x_m + x_{k+1}(x_1, x_2)$$
 (33)

Они имеют множество разбиений x_m, x_{k+1} в которых второе слагаемое есть частичная сумма этапа три с оптимальным результатом x_1, x_2 . Каждое из них задает конкретный режим работы средств (терминала) или грузового района в целом с издержками $Z_n(x_m, x_1, x_2)$,
 $Z_{k+1} = Z'_i(x_1) + Z''_i(x_2)$
 Среди них есть вариант с наименьшими суммарными издержками.

$$Z_k = min(Z_n(x_m, x_{k+1}) + Z_{k+1}(x_{k+1}), \forall x_{k+1})$$
 (34)

Определяет конечную траекторию.

$$x_k = x_1 + x_2 + x_m = x_m + x_{k+1}, x_{k+1} = x_1 + x_2$$
 (35)

На этапе 1 среди множества разбиений $x_{k+1} = x_1 + x_2 + x_3$ выбирается оптимальное с результатом $Z_k = min(Z_{k+1}, \forall x_{k+1})$. Он определяет оптимальный режим единого технологического процесса терминала (рис. 5)

Этапы решения

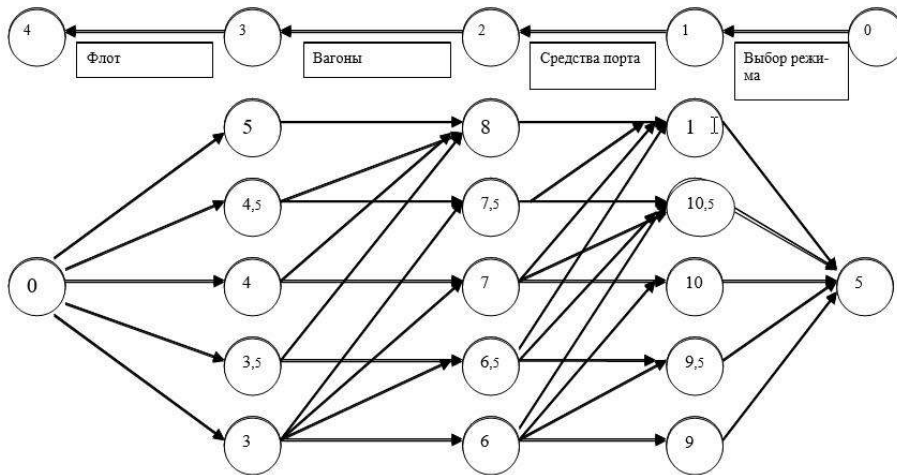


Рис. 5. Принципиальная схема оптимизации технологического процесса порта методом динамического программирования

Решение проблемы по изложенным выше этапам представлено на рис. 5. Здесь этапы решения от начального ноль до конечного четыре ориентированы справа на лево. В таком случае задачи от конечного этапа к начальному ориентировано слева на право. «Вместе с тем необходимо определиться со структурой рекуррентных вычислений в ДП. Проводимые расчёты на некотором этапе

осуществляются на основе сводной информации о максимальном объеме транспортной продукции. При этом отдельные решения, определяемые на предыдущих этапах не являются определяющими. Исходя из положения о том, что последующие решения принимаются по оптимальному принципу, являющейся основой, не зависимо от решений принимающихся на предыдущих этапах.

Важным является действия позволяющие автоматически выводить из исследования определять величины x_j позволяющие сомнительные проекты, (дуги) не имеющие перспектив реализации» [7].

Воспользуемся рекуррентным обозначение, применяемым при рассмотрении сетевой модели, которое можно определить выражением:

$$f_j(x_j) = \left(\begin{matrix} \max \\ \text{по..допустимым.} \\ \text{проектам.}k_j \end{matrix} \right) \{R_j(k_j) + f_{j-1}(x_{j-1})\}, j = 1,2,3. \quad (36)$$

таким образом в динамическом программировании рекуррентное соотношение имеет вид:

$$f_0(x_0) \equiv 0, f_j(x_j) = \left(\begin{matrix} \max \\ c_j(k_j) \leq x_j \end{matrix} \right) \{R_j(k_j) + f_j(x_j - c_j(k_j))\}, j = 1,2,3. \quad (37)$$

Методом ДП могут решаться и задачи, приводящие к сетевым транспортным моделям. При наличии ориентированной сети, содержащей N точек (узлов) возможно найти кратчайший путь из точки 1 в точку, если задана матрица (a_{ij}) расстояний из i в j не соединены дугами, то следует считать, что соответствующие $a_{ij} = \infty$, а $a_{ij} = 0$. При построении модели транспортной системы с выбором кратчайшего пути обозначим через Z_i^* минимальный путь из точки i в N . Оптимальный маршрут из любой точки i обладает тем свойством, что каков бы ни был способ достижения пункта i , последующее решение должно быть оптимальны для части пути, начинающего в точке i в соответствии с принципом оптимальности. Пусть из

точки i можно перейти в j , расстояние между этими точками равно a_{ij} . Точка j должна выбираться таким образом, чтобы путь из j в N был частью оптимального пути из i в N . Обозначим минимальный путь из j в N через Z_j^* . Тогда j выбирается из условия минимизации суммы $a_{ij} + Z_j^*$. Таким образом получаем уравнение Беллмана

$$Z_i^* = \min_{j \neq i} \{a_{ij} + Z_j^*\} \quad (38)$$

В итоге условной оптимизации получим совокупность условных оптимальных решений, используя которые, последовательно определяются точки, соответствующие оптимальному маршруту (рис. 9).

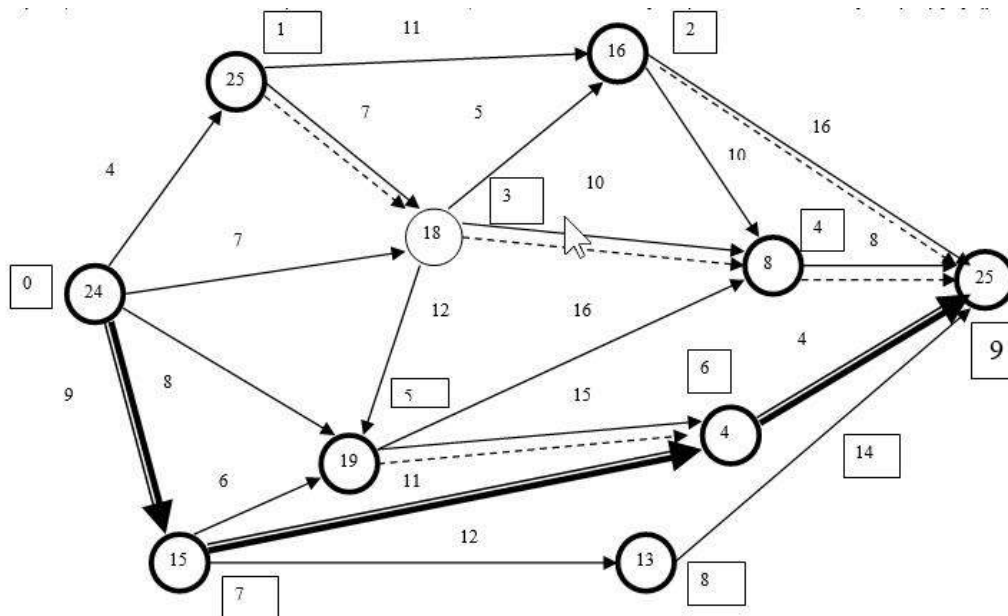


Рис. 6. Оптимальный маршрут транспортной сети

При нахождении кратчайшего пути из пункта 0 в пункт 9 на сети (рис. 3) к множеству A_4 точки 4 и 6, из которых можно попасть в точку 9 не более чем за один шаг; к множеству A_3 точки 2,5 и 8 (не более чем два шага до 9); к A_2 - точки 3 и 7 (не более чем три шага до 9); к A_0 - точку 0. Условные оптимальные маршруты,

начинающиеся в i , будем отражать дополнительной пунктирной стрелкой, начинающейся в i до N записывать в кружке очки i .

Сначала найдём $Z_5^*(4) = 8$; $Z_5^*(6) = 4$ и $(A_4) = 9$. Далее определим

$$Z_4^*(2) = \min \begin{cases} 16 \dots \dots \dots \text{при} \dots \dots u_4(2) = 9 \\ 10 = 8 \dots \dots \dots \text{при} \dots \dots u_4(2) = 4 \end{cases} \quad \text{т.е.} \quad Z_4^*(2) = 16, \dots \dots u_4^*(2) = 9; \quad (39)$$

$$Z_4^*(5) = \min \begin{cases} 16 + 8 \dots \dots \dots \text{при} \dots \dots u_4(5) = 4 \\ 15 + 4 \dots \dots \dots \text{при} \dots \dots u_4(5) = 6 \end{cases} \quad \text{т.е.} \quad Z_4^*(5) = 19, \dots \dots u_4(8) = 6; \quad (40)$$

$$Z_4^*(8) = \min \begin{cases} 9 + 4 \dots \dots \dots \text{при} \dots \dots u_4(8) = 6 \\ 14 \dots \dots \dots \text{при} \dots \dots u_4(8) = 9 \end{cases} \quad \text{т.е.} \quad Z_4^*(8) = 13, \dots \dots u_4(8) = 6 \quad (41)$$

Получим минимальный путь равный $Z_1^*(0) = 24$. Соответствующий маршрут проходит через точек 0,7,6, 9.

Анализ динамических моделей смежных видов транспорта показывает, что данный инструментарий позволяет решать оптимизационные задачи прогнозирования и управления процессами в региональной и локальных транспортных системах в период модернизации и проектирования.

Заключение

В прикладном плане актуальность использования транспортных моделей неуклонно повышается. Современные реалии требуют системного подхода к процессу прогнозирования и более согласованного взаимодействия смежных видов транспорта, их организационных структур при выработке и реализации транспортных стратегий в регионах, транспортных узлах и мегаполисах

Основными направлениями дальнейших исследований по вопросам единого описания транспортных процессов являются разработка новых, совершенствование существующих моделей и комплексных подходов к разработке моделей для описания транспортной системы.

Для выполнения дальнейших исследований большое значение имеет возможность формального описания транспортных процессов, например, для процессов прогнозирования. При использовании отдельных моделей необходимо тщательно исследовать их применимость в конкретной ситуации. Это относится и к моделям комплексных транспортных задач и системного анализа.

Инструментарий ДП не потерял своей актуальности, несмотря на то, что предложенные модели являются достаточно общим отображением транспортного процесса, в котором учтены основные взаимосвязи между следующими главными компонентами: транспортной сетью, грузопотоками и потоками транспортных средств, а также количеством грузов на терминалах в порту и на подходах к ним.

Методы ДП ориентированы на повышение эффективности в решении транспортных задач путем их разбиения на относительно небольшие и, следовательно, легко поддающиеся решению подзадачи. При этом принцип оптимальности является основой поэтапного решения задачи, однако он не содержит информации о способах решения подзадач, возникающих на каждом этапе. В этой связи принцип оптимальности иногда рассматривается как слишком общий для того чтобы быть полезным в практических исследованиях. Возможны ситуации, когда декомпозиция задач осуществлена надлежащим образом, а числовой результат получить не удастся вследствие большой сложности оптимизационных подзадач, связанных с каждым этапом. Однако следует отметить, что, несмотря на указанные недостатки, метод ДП существенно облегчает решение целого ряда практических задач [8].

Сформулированная проблема принадлежит к классу задач оптимизации взаимосвязанных потоков на сети: первичного, представляющего потока транспортных средств по транспортной сети, и вторичного – потока перевозимых им грузов

Масштабность возникающих перед государственными органами, менеджментом и проектными организациями задач, необходимость взаимосвязанного учета большого количества факторов — обуславливает необходимость дальнейшего проведения исследований в области транспортных процессов и систем. Уровень развития информационных технологий позволяет определять проблему использования методов автоматизации и искусственного интеллекта при разработке транспортных моделей для оптимизации транспортной системы и прогнозных оценок, последствий планируемых и реализуемых проектных решений по развитию транспортной инфраструктуры региона и страны.

Литература

1. Шрамко А.П. Инструментарий динамического программирования в оптимизации региональной транспортной системы А.П. Шрамко. Мир транспорта.– 2017.– Т.15.– №5(72).– С.138-145.
2. Постановление Правительства РФ. № 5810 от 08.09.2001 «О федеральной целевой программе «Юг России»
3. Андрианов В.Е. Моделирование и программное обеспечение процессов управления портовыми перегрузочными машинами: дис...канд. техн. наук: 05.13.06. Андрианов Владислав Евгеньевич. – СПб. – 2005 г.

4. Алибеков Б.И. Логистика грузовых перевозок региональных транспортных систем: моделирование и управление. Б.И. Алибеков; – Ростов н/Д: Рост. Гос. ун-т путей сообщения. 2010.–179 с.
5. Гасников А.В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие А.В. Гасников и др. под ред А.В. Гасникова.– издание 2-е, испр. и доп. – М.: МЦНМО, 2013. – 427 с.
6. Кузнецов А.П. Методологические основы управления грузовыми перевозками в транспортных системах А.П. Кузнецов. – М.: ВИНТИ, 2002.
7. Шрамко А.П. Разработка прогнозных моделей развития региональной транспортной системы А.П. Шрамко, С.В. Андреев. Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– №2(83).– С.20-26.
8. Мамаев Э.А. Динамическая модель инвестиций в развитие основных производственных фондов предприятия Э.А. Мамаев Вестник РГУПС. – 2004. - №3. – С.81-82.

References

1. Shramko A.P. Instrumentarii dinamiceskogo programmirovaniya v optimizacii regionalnoi transportnoi sistemi [Dynamic programming toolkit in the optimization of the Regional transport system]. A.P. Shramko. Mir transporta.– 2017.– Т.15.– №5_72,.– S.138_145.
2. Postanovlenie Pravitelstva RF. № 5810 ot 08.09.2001 «O federalnoi celevoi programme «Yug Rossii» [On the Federal Task Force» South Russia].
3. Andrianov V.E. Modelirovanie i programmnnoe obespechenie protsessov upravleniya portovymi peregruzochnymi mashinami: [Modeling and software management processes of port overload machines]dis...kand. tehn. nauk: 05.13.06.Andrianov Vladislav Evgen'evich. – SPb. – 2005 g.
4. Alibekov B.I. Logistika gruzovyh perevozk regional'nyh transportnyh sistem: modelirovanie i upravlenie. [Logistics of freight transportation of regional transport systems: modeling and management]. B.I. Alibekov;– Rostov n/D: Rost. Gos. un-t putej soobschenija. 2010.–179 s.
5. Gasnikov A.V. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov:[Introduction to mathematical vodeling of transport flows] uchebnoe posobie A.V. Gasnikov i dr. pod red A.V. Gasnikova.– izdanie 2-e, ispr. i dop. – М.: МСНМО, 2013. – 427 s.
6. Kuznecov A.P. Metodologicheskie osnovy upravleniya gruzovymi perevozkami v transportnyh sistemah [Introduction to mathematical modeling of transport flows] A.P. Kuznecov. – М.: VINITI, 2002.
7. Shramko A.P. Razrabotka prognoznyh modelej razvitiya regional'noj transportnoj sistemy [Development of forecast models of development of the regional transport system]A.P. Shramko, S.V. Andreev. Ekspluatatsiya morskogo transporta.– 2017.– №2(83).– S.20-26.
8. Mamaev `E.A. Dinamicheskaja model' investitsij v razvitie osnovnyh proizvodstvennyh fondov predpriyatija [Dynamic model of investment in the development of the main production facilities of the enterprise]E.A. Mamaev Vestnik RGUPS. – 2004. - №3. – S.81-82.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Александр Павлович Шрамко, кандидат экономических наук, доцент, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова 353913, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина 93, e-mail: ozenka-shramko@mail.ru

Alexander P. Shramko Ph.D (Econ), State maritime university. adm. F.F. Ushakov. 353913, Krasnodar Territory, Novorossiysk, Lenin Avenue 93. e-mail: ozenka-shramko@mail.ru

Поступила в редакцию: 27.07.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 004.896

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.051>

Разработка интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебедки

С.П. Черный¹, e-mail: kepapu@knastu.ru, А.К. Тимофеев¹, e-mail: timofeev.knastu@yandex.ru,
А.В. Бузикаева¹, e-mail: kepapu@knastu.ru

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Аннотация Данная работа посвящена моделированию интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебедки с применением теории нечетких множеств. Был приведен анализ существующих систем управления электроприводами якорно-швартовых узлов основанных на различных традиционных схемах регулирования, показаны достоинства и недостатки традиционных систем управления, а также выявлены основные возмущения, носящие существенно-недетерминированный характер. Процедуры интеллектуального управления в реализуемой модели системы управления электроприводом реализуются нечетким регулятором. Интеллектуальная система управления в своей основе имеет нечеткий регулятор с алгоритмом вывода Сугено, формализация входных сигналов по ошибке осуществляется двумя лингвистическими переменными. Кроме того, показано преимущество предлагаемого подхода при построении систем управления электроприводами якорно-швартовых узлов на основании базовых показателей качества. **Ключевые слова:** электропривод, якорная лебедка, нечеткий регулятор, лингвистическая переменная, интеллектуальная система управления, алгоритм вывода Сугено.

Development of an intelligent electric drive control system anchor winch

Sergey P. Cherniy¹, e-mail: kepapu@knastu.ru, Anton K. Timofeev¹, e-mail: timofeev.knastu@yandex.ru,
Alina V. Buzikaeva¹, e-mail: kepapu@knastu.ru

¹Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Abstract This paper is devoted to the modeling of an intelligent control system for the electric drive of an anchor winch using the theory of fuzzy sets. The analysis of the existing control systems for electric drives of anchor and mooring units based on various traditional control schemes was given, the advantages and disadvantages of traditional control systems were shown, and the main disturbances of a significantly non-deterministic nature were identified. Intelligent control procedures in the implemented model of the electric drive control system are implemented by a fuzzy controller. The intelligent control system is based on a fuzzy controller with the Sugeno output algorithm, the formalization of input signals by error is carried out by two linguistic variables. In addition, the advantage of the proposed approach in the construction of control systems for electric drives of anchor and mooring units on the basis of basic quality indicators is shown.

Key words: electric drive, anchor winch, fuzzy regulator, linguistic variable, intelligent control system, Sugeno output algorithm.

Введение

Широкое и активное освоение мирового океана, а также развитие военно-морского флота обуславливает постоянно возрастающее строительство различных надводных судов, имеющих совершенно разные задачи: от перевозки людей, транспортировки грузов между континентами и рыбного промысла до выполнения особых стратегических операций на океанских и морских театрах боевых действий. Все эти суда снабжаются современными, в высшей степени надежными электромеханическими системами, включающими в себя сотни электрических машин, тысячи электрических аппаратов и других приборов.

Высокая надежность работы судовых механизмов обеспечивается не только высококачественным производством составляющих элементов, но и обширным введением автоматических устройств контроля, управления и регулирования с использованием современных достижений электротехники. Планирование и проектирование электромеханической части судов в наше время – многоцелевая задача, так как режимы работы судовых электроприводов, наряду с их конструкциями, отличаются большой сложностью.

Судовые электроприводы приводят в движение промысловые, грузовые, шлюпочные лебедки,

грузоподъемные краны, устройства машинно-котельного отделения и прочие корабельные установки. Большая часть энергии, производимой судовыми электростанциями, потребляется электроприводами.

Якорно-швартовное устройство – одно из наиболее значимых механизмов на корабле, гарантирующих его безопасное использование. Шпильевые и брашпильные механизмы необходимы для подъема и спуска якорей, выполнения швартовых и прочих операций.

Работа любого шпильевого и брашпильного электропривода обуславливается скоростью вычисления якорной цепи или швартовного троса, величиной тягового усилия, временем режима работы. Несмотря на современное развитие технологий в данной области, судовые электроприводы якорно-швартовых устройств имеют некоторые существенные недостатки, такие как недостаточный широкий диапазон регулирования скорости двигателя, а также увеличение механических нагрузок системы из-за сильных толчков динамического момента при пуске [8]. Последний недостаток ведёт к снижению надёжности системы, способствует скорейшему износу и уменьшению срока службы якорного оборудования [2].

Для всех описанных выше систем присущи, в общем, аналогичные недостатки, связанные с

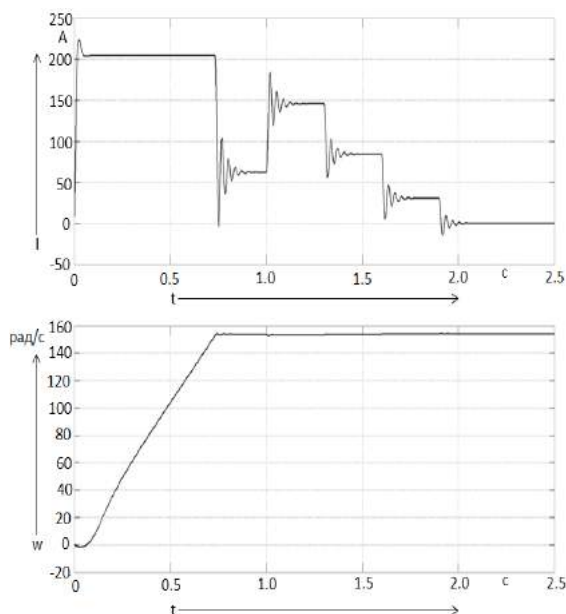


Рис.3. График переходных характеристик по току и скорости при отработке условного цикла работы брашпиля

Анализируя графики, представленные выше, можно сделать вывод, что система электропривода, включающая в себя частотный преобразователь, работающий по векторному закону управления, и асинхронный электродвигатель, обрабатывает все подаваемые моменты нагрузки. Однако, необходимо отметить, что для классических систем управления существует ряд недостатков, связанных с тем, что они не обеспечивают:

- автоматического ограничения момента электродвигателя при отрыве якоря от грунта, что в механизмах высокой мощности часто влечет за собой поломки устройства или обрыв якорной цепи (так как за повышением мощности всегда следует уменьшение запаса прочности механизмов);
- ограничения бросков пусковых и тормозных токов, что иногда является причиной кругового огня на коллекторе и короткого замыкания в щеточном механизме двигателя [4].

Системы управления электроприводами применяются в широком спектре многогранных задач, несмотря на это, существует целый ряд недостатков, которые классические системы, в частности для якорно-швартовного устройства, не всегда позволяют получать хорошие результаты, что обусловлено поведением объекта во внешней среде [11,12].

В данном случае ряд недостатков, возможно, минимизировать с помощью интеграции в систему нечеткого логического регулятора.

На сегодняшний день интеллектуализация управления техническими объектами является актуальной проблемой.

Для решения подобного рода задач целесообразно применение методик, которые будут ориентированы на моделирование систем автоматического регулирования, реализующих процедуры управления целыми классами систем электроприводов с учетом требований и особенностей их функционирования, при этом гибкость законов регулирования формируется путем применения технологии нечеткого управления.

В таких случаях интеллектуальная система направлена на компенсацию большого числа нелинейностей, устранение внешних и внутренних детерминированных воздействий, а также нейтрализацию неполноты информации и устранению большого числа допущений.

Технология внедрения нечетких регуляторов в системы управления электроприводами позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы.

Алгоритмы и процедуры, применяемые в интеллектуальных системах управления, реализованные на основе нечетких регуляторов, могут быть использованы в различных технологических процессах, использующихся в электроэнергетике, робототехнике и на транспорте.

Внедрение таких интеллектуальных систем, наиболее актуально для сложных технологических процессов в таких наукоемких областях, как альтернативная энергетика, где присутствует необходимость контролировать большое количество взаимосвязанных параметров, в ветрогенераторах или солнечных батареях, позволит оптимизировать процедуры и процессы управления с учетом многокритериальности и многофакторности поставленных задач.

Благодаря гибкой настройке НЛР и расширению диапазона регулирования можно адаптировать систему управления под заданные требования и критерии регулирования [1].

Настройка интеллектуальной системы управления электропривода якорно-швартовочного устройства

Модель интеллектуальной системы управления реализована на основе регулятора построенного с использованием алгоритма нечеткого вывода Такаги – Сугено второго порядка, реализующий ПИД – закон управления. Структурная схема интеллектуальной системы управления представлена на рисунке 4.

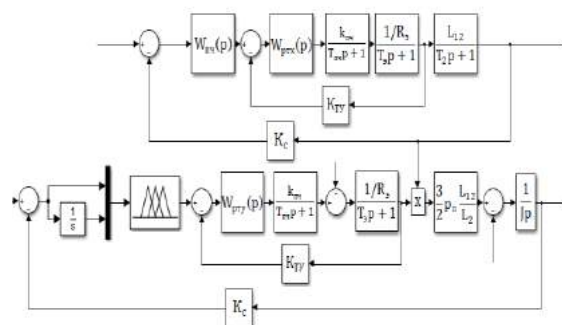


Рис.4. Структурная схема интеллектуальной системы управления электроприводом якорно-швартовочного устройства

Нечеткий регулятор, построенный с использованием алгоритма нечеткого вывода Сугено, функциональная схема которого представлена на рисунке 5, имеет две лингвистические переменные на входе и одну на выходе.

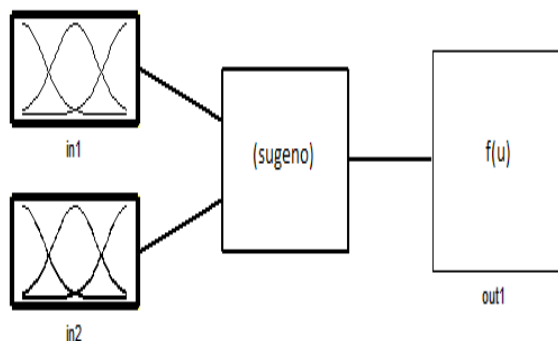


Рис. 5. Функциональная схема нечеткого регулятора

Область определения базового терм множества лингвистических переменных in_1 , in_2 определялась на основе максимальных отклонений соответствующих входных сигналов.

Лингвистическая переменная “ in_1 ” формализует понятие «ошибка сигнала по скорости» с заданной областью определения $[-0.08992 \ 10]$.

Базовое терм-множество лингвистической переменной in_1 представляет собой набор следующих элементов: $in_1 = \{1cl1, 1cl2\}$, где $1cl1$ – наименьшее значение ошибки по скорости; $1cl2$ – наибольшее значение ошибки по скорости [3]. В заданной области определения базового терм-множества распределены две гауссовых функции принадлежности, представленных на рисунке 6.

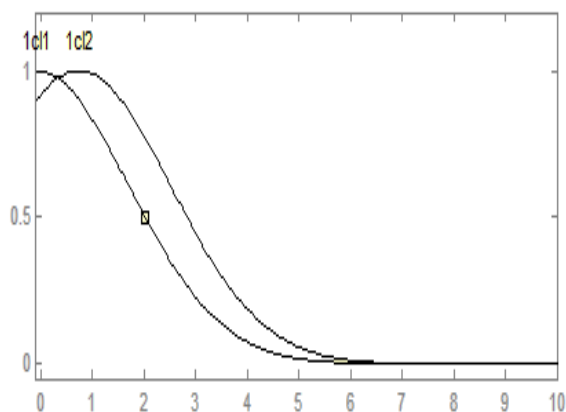


Рис. 6. Распределение нечетких терм лингвистической переменной “ in_1 ”

Лингвистическая переменная “ in_2 ” формализует понятие «интегральная составляющая сигнала ошибки по скорости» [7] с областью определения расположенной в интервале $[0 \ 0.3845]$.

Терм-множество лингвистической переменной in_2 содержит аналогичный набор элементов: $in_2 = \{2cl1, 2cl2\}$, где $2cl1$ – наименьшее значение; $2cl2$ – наибольшее значение интегральной составляющей ошибки по скорости. На рисунке 7 показано распределение функций принадлежности интегральной составляющей сигнала ошибки в заданном диапазоне регулирования.

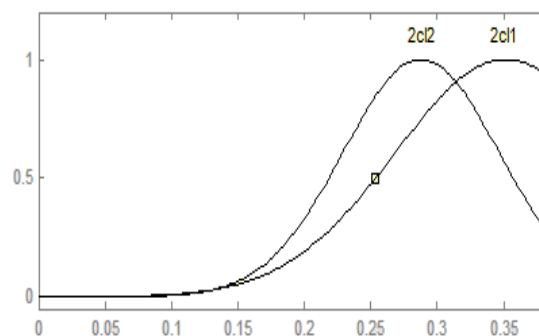


Рис. 7. Распределение нечетких терм лингвистической переменной “ in_2 ”

Блок дефаззификации описывается лингвистической переменной “ out_1 ”, состоящей из двух полиномов, реализующих ПИД – закон управления.

С учетом выбранного алгоритма нечеткого вывода продукционная база знаний может быть представлена двумя правилами и будет иметь вид:

1. Если (“ in_1 ” есть “ $1cl1$ ”) и (“ in_2 ” есть “ $2cl1$ ”), то (“ out_1 ” = $(36.1 \cdot x + 877.7 \cdot y - 363.4)$);
2. Если (“ in_1 ” есть “ $1cl2$ ”) и (“ in_2 ” есть “ $2cl2$ ”), то (“ out_1 ” = $(5.513 \cdot x + 223.1 \cdot y + 23.21)$).

Оценку эффективности работы предложенного нечеткого регулятора проведем путем сравнения переходных характеристик в классической системе управления и в системе, использующей интеллектуальный подход (рис. 8).

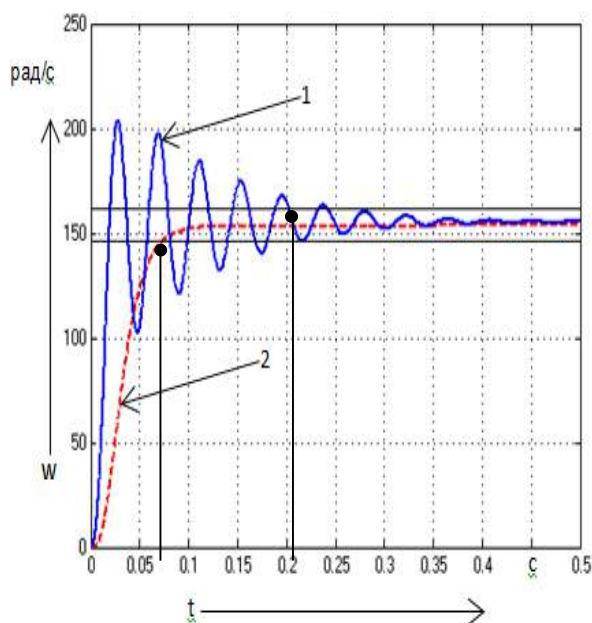


Рис. 8. Переходная характеристика электропривода по скорости

- 1 - Классический регулятор скорости
- 2 – Интеллектуальная система управления

Результаты моделирования наглядно показывают, что переходные характеристики в системе с классическим регулятором обладают ярко выраженными затухающими колебаниями, при этом изменение скорости в интеллектуальной системе протекает по аperiodическому закону. Такая форма переходного процесса показывает некоторое превосходство нечеткой системы управления по основным характеристикам - быстродействию и перерегулированию. Анализируя представленные графики переходных функций (рисунок 8) в классической системе и системе построенной с использованием теории нечетких множеств, можно отметить, что время переходного процесса сокращается в 2 раза, при отсутствии перерегулирования. Данная нечеткая система управления позволяет достаточно просто заменить классический ПИД-регулятор, при этом его настройка становится интуитивно понятной и легко реализуемой. Внедрение интеллектуальной системы управления позволит учитывать гораздо большее количество информации, частично решая проблему неполноты информации.

Кроме того, необходимо отметить, что реализованная модель нечеткой системы управления электроприводом якорно-швартовного устройства позволяет нивелировать воздействия таких недетерминированных внешних возмущений, как вязкость грунта, глубина погружения и волнение

Заключение

Технология внедрения нечетких регуляторов в системы управления электроприводами позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы.

Кроме того, такая система проявляет существенные адаптивные свойства, что позволяет проводить гибкую настройку системы управления, относительно требований предъявляемых к объекту регулирования.

Проведенный анализ существующих систем управления электроприводами якорно-швартовных узлов, основанных на различных традиционных схемах регулирования, выявил их основные недостатки, связанные с существенным количеством допущений, неполнотой информации и ограниченным диапазоном регулирования.

В работе представлена модель интеллектуальной системы управления электроприводом якорно-швартовного устройства, реализованной на базе нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Сугено второго порядка. Полученная система управления, способна минимизировать влияние недетерминированных возмущений на электропривод при его функционировании.

Результаты моделирования наглядно показывают, что система с внедренным нечетким модулем имеет более качественные переходные характеристики, при которых удалось добиться увеличения быстродействия системы, избавиться от затухающих колебаний и перерегулирования.

Литература

1. Соловьев, В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами, В. А Соловьев, С.П. Черный – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 63с.
2. Васильченко, С. А. Элементы систем корабельной автоматики : учеб. Пособие, С. А. Васильченко. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 104 с.
3. Cherniy, S.P. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities, S.P. Cherniy, V.I. Susdorf, A.V. Buzikaeva, V.N. Khruikov - EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19, DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496.
4. Чекунов, К. А. Судовые электроприводы и электродвижение судов, К. А. Чекунов. – Л.: Судостроение, 1969. – 464 с.
5. Богословский, А. П. Судовые электроприводы, в 2 т. Т. 1 под ред. А. П. Богословского. – Л.: Судостроение, 1976. – 814 с.
6. Краковский, И. И. Судовые вспомогательные механизмы, И. И. Краковский. – М.: Транспорт, 1972. – 380с.
7. Кудинов Ю.И. Нечёткие системы управления. Техническая кибернетика. – 1990. – № 5. – С.196–201.
8. Качаловский, М. С. Теория и устройство судов, М. С. Качаловский. – М.: Транспорт, 1968. – 198 с.
9. Справочник судового электротехника. В 3 т. Т. 1 под ред. Г. И. Китаенко. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. – 528 с.
10. Терехов, В.М. Системы управления электро-приводов, В. М. Терехов, О. М. Осипов. – М.: Академия, 2006. – 304 с.
11. Ключев, В. П. Теория электропривода В. П. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
12. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления, А. А. Первозванский. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1986. 616 с.
13. Бесекерский, В. А., Попов, Е. П. Теория систем автоматического регулирования, В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. М., Наука, 1972. 768 с.

References

1. Solov'ev, V.A. Iskusstvennyj intellekt v zadachah upravleniya. Intellektual'nye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi processami [Artificial intelligence in control tasks. Intelligent process control systems]. V. A Solov'ev, S.P. CHernyj – Vladivostok: Dal'nauka, 2010. – 63s.
2. Vasil'chenko, S. A. Elementy sistem korabel'noj avtomatiki [Elements of ship automation systems]. : ucheb. Posobie, S. A. Vasil'chenko. – Komsomol'sk-na-Amure : FGBOU VO «KnAGTU», 2016. – 104 s.

3. Cherniy, S.P. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities, S.P. Cherniy, V.I. Susdorf, A.V. Buzikaeva, V.N. Khrulkov - EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19, DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496.
4. СНекунув, К. А. Судовые электроприводы и электродвижения судов [Ship electric drives and electric propulsion of ships]. К. А. СНекунув. – Л.: Судостроение, 1969. – 464 с.
5. Bogoslovskiy, A. P. Судовые электроприводы [Ship electric drives]. в 2 т. Т. 1 под ред. А. П. Богословского. – Л.: Судостроение, 1976. – 814 с.
6. Krakovskiy, I. I. Судовые вспомогательные механизмы [Ship auxiliary machinery]. I. I. Krakovskiy. – М.: Транспорт, 1972. – 380с.
7. Kudinov Yu.I. Nечеткие системы управления, Tekhnicheskaya kibernetika [Fuzzy Control Systems. Technical Cybernetics]. – 1990. – № 5. – С.196–201.
8. Kachalovskiy, M. S. Теория и устройство судов [Theory and structure of ships]. M. S. Kachalovskiy. – М.: Транспорт, 1968. – 198 с.
9. Spravochnik sudovogo jelektrotehnika [Handbook of ship electrical engineer]. V 3 t. T. 1 под ред. G. I. Kitaenko. – 2-e izd. pererab. i dop. – Л.: Судостроение, 1980. – 528 с.
10. Terehov, V.M. Sistemy upravleniya jelektro-privodov [Electric drive control systems]. V. M. Terehov, O. M. Osipov. – М.: Академия, 2006. – 304 с.
11. Kljuhev, V. P. Теория jelektroprivoda [Electric drive theory]. V. P. Kljuhev. – М.: Jenergoatomizdat, 2001. – 704 с.
12. Pervozvanskij, A. A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory course]. A. A. Pervozvanskij. – М.: Nauka. Gl. red. fiz. – mat. lit., 1986. 616 с.
13. Besekerskij, V. A., Popov, E. P. Теория sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. V. A. Besekerskij, E. P. Popov. М., Nauka, 1972. 768 с.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Петрович Черный, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +7(924)2254129; e-mail: kepapu@knastu.ru

Алина Валерьевна Бузикаева, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +7(914)2176228; e-mail: epapu@knastu.ru

Антон Константинович Тимофеев, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, тел.: +7(914)4263855; email: timofeev.knastu@yandex.ru

Sergey P. Cherniy, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State University, 681013, Komsomolsk-on-Amur, st. Lenin, 27, tel. : +7(924)2254129; e-mail: kepapu@knastu.ru

Alina V. Buzikaeva, graduate student of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State University, 681013, Komsomolsk-on-Amur, st. Lenin, 27, tel. : +7 (914) 2176228; e-mail: epapu@knastu.ru

Anton K. Timofeev, graduate student of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State University, 681013, Komsomolsk-on-Amur, st. Lenin, 27, tel. : +7 (914) 4263855; email: timofeev.knastu@yandex.ru

Поступила в редакцию: 27.1.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

Адаптивные системы управления судовыми тепловыми установками

С.А. Гордин¹, e-mail: gordin@knastu.ru **И.В. Зайченко**¹, e-mail: zaychenko@inbox.ru
К.Д. Хряпенко¹, e-mail: vicarious024@mail.ru, **В.В. Бажеряну**¹, e-mail: pmi@knastu.ru
¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос повышения точности и качества управления приводом сетевых насосов в составе судовых тепловых установок в системе отопления судна путем применения адаптивной системы автоматического управления. При использовании классических систем управления на основе ПИД-регуляторов для управления мощностью электродвигателя по критерию обеспечения заданного давления в системе теплоснабжения в условиях резкопеременных тепловых нагрузок могут возникать ситуации разрегулирования системы вследствие возникновения дополнительного давления в тепловой установке при термическом расширении теплоносителя. Для обеспечения надежности и безаварийности работы судовых тепловых установок при резкопеременных нагрузках авторами рассматривается возможность использования для управления мощностью электропривода адаптивной системы управления. В статье рассмотрена схема управления с адаптацией коэффициентов ПИД-регулятора на базе нейронной сети (нейросетевой оптимизатор). Нейросетевой оптимизатор был применен как надстройка над ПИД-регулятором в схеме управления мощностью сетевого насоса в составе судовой тепловой установки. Рассмотрены зависимости характеристик систем управления от структуры и параметров модифицированных критериев точности и качества управления. Адаптация параметров регулирования позволяет обеспечить достижение желаемых параметров с меньшими затратами мощности при сохранении уровня надежности и исключить разрегулирование системы управления при резкопеременных тепловых нагрузках.

Ключевые слова: судовые тепловые установки, повышение надежности, системы управления, оптимизация, нейронные сети.

Adaptive control systems for marine thermal installations

Sergey A. Gordin¹, e-mail: gordin@knastu.ru **Ilya V. Zaichenko**¹, e-mail: zaychenko@inbox.ru
Ksenya D. Khryapenko¹, e-mail: vicarious024@mail.ru, **Viktoria V. Bazheryanu**¹, e-mail: pmi@knastu.ru
¹Komsomolsk-on-Amur State University, Russian Federation

Abstract. The article discusses the issue of improving the accuracy and quality of control of the drive of network pumps as part of ship thermal installations in the ship's heating system by using an adaptive automatic control system. When using classical control systems based on PID regulators to control the power of the electric motor according to the criterion of providing a given pressure in the heat supply system under conditions of sharply varying thermal loads, situations of system maladjustment may occur due to the appearance of additional pressure in the thermal installation during thermal expansion of the coolant. To ensure the reliability and trouble-free operation of ship thermal installations under abruptly variable loads, the authors consider the possibility of using an adaptive control system to control the power of an electric drive. The article describes a control scheme with adaptation of the PID controller coefficients based on a neural network (neural network optimizer). The neural network optimizer was used as a superstructure over the PID controller in the power control circuit of a network pump as part of a ship's thermal installation. The dependences of the characteristics of control systems on the structure and parameters of the modified criteria for the accuracy and quality of control are considered. Adaptation of control parameters allows achieving the desired parameters with lower power consumption while maintaining the level of reliability and eliminating deregulation of the control system at abruptly varying thermal loads.

Key words: marine thermal installations, reliability improvement, control systems, optimization, neural networks.

Введение

Развитие технологий энергосбережения позволяет повышать энергетическую эффективность не только основной энергетической установки судна, но и вспомогательного оборудования, включая тепловые установки и утилизационные котлы в системе отопления судна. Обеспечение циркуляции теплоносителя в системе отопления судна осуществляется циркуляционным насосом, номинальная производительность которого должна быть требуемой не менее чем на 25% [1]. Эффективная работа тепло-энергетических установок различного назначения возможна лишь при их оснащении современными системами автоматического управления (САУ) и системами автоматического регулирования (САР), расширении их функциональных возможностей [1].

Классический метод управления подачей насосных установок предполагает дросселирование

напорных линий и регулирование количества работающих агрегатов по давлению в трубопроводе. Насосные агрегаты в этом случае постоянно функционируют с постоянной частотой вращения, без учёта изменяющихся расходов, вызванных переменным водопотреблением. При минимальном расходе насосы продолжают работу с постоянной частотой вращения, что приводит к повышенному расходу электроэнергии. Применение частотно-регулируемых приводов с функцией ПИД-регулирования позволяет регулировать производительность насосных агрегатов и снижать их энергопотребление при обеспечении требуемого уровня давления в трубопроводе [2].

Иногда в системах отопления при применении частотно-регулируемого привода с функцией ПИД-регулирования на поддержание заданного в тепловой сети давления при определённом сочетании внешних факторов и режимов работы системы наблюдается разрегулирование: ПИД-

регулятор в попытках удерживать заданное давление постепенно повышает, либо понижает частоту вращения электропривода до предельных значений. Для некоторых режимов работы тепловой сети такая ситуация становится аварийной.

Настоящая работа посвящена исследованию причин возникновения условий разрегулирования системы управления и разработке решения, позволяющего исключить аварийные режимы, повысить надёжность и энергоэффективность системы управления судовыми тепловыми установками.

1. Исследование эффективности системы регулирования производительности сетевых насосов в системе теплоснабжения судна

Общая схема частотно-регулируемого электропривода с ПИД-регулированием [3] приведена на рис. 1.

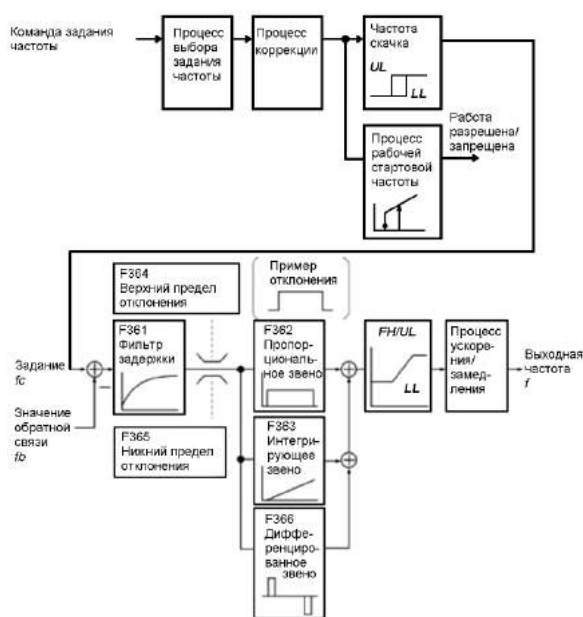


Рис. 1. Общая схема управления

Такая схема регулирования позволяет поддерживать заданное давление в трубопроводе системы отопления с применением только одного датчика давления. Но опыт эксплуатации частотно-регулируемого электропривода с ПИД-регулированием на различных системах теплоснабжения показал, что такая схема в некоторых случаях работает не корректно и происходит разрегулирование системы. С целью определения причины и выработки способа устранения дефекта системы управления, были выполнены теоретические и практические исследования.

Тепловое воздействие на теплоноситель, находящийся в объёме котла приводит к его термическому расширению и, как следствие, повышению давления [4]. Выполним оценку изменения давления теплоносителя (воды) в котле при её нагреве от температуры T_0 до температуры T_s и давлении на входе в котел p_0 .

Процесс изменения давления в заданном объёме при нагреве описывается через уравнения

неразрывности, теплопроводности и состояния жидкости:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho_l v_l) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} + v_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = \frac{V_l^{(T)}}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\rho_l = p_{l0} \left(1 - \alpha^{(T)} (T_l - T_{l0}) + \alpha^{(p)} (p - p_0) \right) \quad (3)$$

где $\rho_l, V_l^{(T)}, v_l, T_l, p$ - плотность, температуропроводность, скорость, температуры и давление жидкости; $\alpha^{(T)}$ - коэффициент термического расширения жидкости; $\alpha^{(p)}$ - коэффициент сжимаемости, определяемый скоростью звука в жидкости и её плотностью; $n = 0, 1$ и 2 соответствуют плоской, радиальной и сферической постановкам задачи. При такой постановке задачи гравитационные эффекты и неоднородность поля плотности малы и ими можно пренебречь.

Система уравнений (1-3) имеет решение, определяющее максимальное давление жидкости в замкнутом объёме при $t \rightarrow \infty$ [5]:

$$p^{(M)} = p_0 + \frac{\alpha^{(T)}}{\alpha^{(p)}} (T_e - T_0) \quad (4)$$

Для воды $\alpha^{(T)} = 10^{-5} K^{-1}$, $\alpha^{(p)} = 10^{-9} Pa^{-1}$, что соответствует увеличению давления в замкнутом объёме на $10^4 Pa$ (0,1 Бар) при нагреве воды на $1^0 K$

В стационарном режиме, когда температура теплоносителя на входе и выходе котельного отделения постоянна, увеличение давления воды от её нагрева компенсируется снижением давления воды от её охлаждения в системе отопления. При этом давление в системе теплоснабжения определяется только производительностью сетевого насоса. В стационарном режиме ПИД-регулятор полностью решает задачу поддержания в системе заданного давления.

В переходном режиме на более высокую температуру теплоносителя (например, ночью для компенсации более низких уличных температур) повышение температуры в системе отопления приводит к увеличению давления на величину, определяемую формулой (4). Для ПИД-регулятора такой прирост является отклонением от заданного значения обратной связи и для компенсации возрастающего давления снижается выходная частота, что приводит к снижению производительности сетевого насоса. Снижение производительности сетевого насоса, с одной стороны, снижает давление в системе до заданной величины, а с другой приводит к снижению расхода теплоносителя в системе отопления. Это приводит к увеличению нагрева теплоносителя в котле и, как следствие, дополнительному повышению средней температуры теплоносителя в системе отопления. В результате действий ПИД-регулятора, производительность сетевого насоса постепенно снижается до минимальной величины.

При переходе на более низкую температуру теплоносителя происходит аналогичный процесс, но уже в сторону повышения производительности насоса: снижение средней температуры в системе отопления приводит к снижению давления на величину, определяемую формулой (4). В этом случае ПИД-регулятор для компенсации снижающегося давления повысит производительность сетевого насоса и постепенно производительность повысится до максимальной величины.

Наличие описанного эффекта вносит дисбаланс в систему отопления и не позволяет эффективно использовать частотно-регулируемый электропривод с ПИД-регулированием для повышения энергоэффективности насосного оборудования.

Ниже приведены экспериментальные данные изменения параметров теплоносителя (давление, расход, температура в прямом и обратном трубопроводах) при отключенном ПИД-регуляторе (рис. 2) и при воздействии ПИД-регулятора (рис.3) в условиях активного повышения температуры в системе отопления. Для удобства анализа результатов, все величины приведены относительно показаний на начало эксперимента.

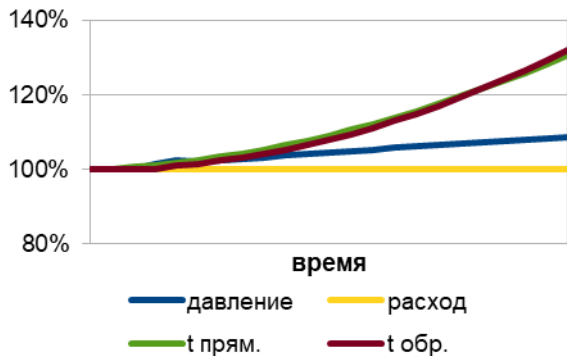


Рис. 2. Показатели работы системы при отключении регулятора

При отключенном ПИД-регуляторе температура теплоносителя в прямом и обратном трубопроводе растут пропорционально, но при этом в системе повышается общее давление в следствии температурного расширения теплоносителя.

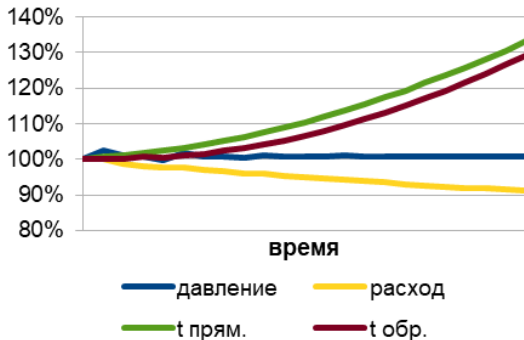


Рис. 3. Показатели работы системы при включении регулятора по давлению

При включении ПИД-регулятор постоянно поддерживает заданное давление, но при этом снижается подача (расход) воды в системе отопления и рост температуры теплоносителя в прямом трубопроводе идёт активнее, чем при отсутствии ПИД-регулирования.

Таким образом, применение частотно-регулируемых приводов с функцией ПИД-регулирования с управлением по давлению в системе отопления судна имеет существенное ограничение: в полностью автоматическом режиме не обеспечивается надежность системы. Но поскольку на текущий момент частотное

регулирование является основным способом снижения энергопотребления электропривода насосных установок, то на практике из-за эффекта разрегулирования управление частотой привода осуществляется в ручном или полуавтоматическом режиме, т.е. автоматический режим включается только на стационарных режимах работы источника теплоснабжения.

2. Адаптивное регулирование производительности сетевых насосов в системе теплоснабжения судна

Для устранения эффекта разрегулирования системы управления производительностью сетевых насосов системы теплоснабжения судна необходимо расширить систему управления адаптивным регулятором, позволяющим изменять параметры ПИД-регулятора [6-8], в том числе изменять уставку требуемого уровня давления в трубопроводе.

Источником дополнительной информации для адаптивного регулятора могут быть использованы показания датчиков температуры и расхода. Поскольку задача адаптивного регулирования для рассматриваемой системы заключается в устранении эффекта разрегулирования, то в качестве основного источника данных будем рассматривать показания датчиков температуры на прямом и обратном трубопроводе.

Тогда решение задачи адаптивного регулирования может быть сформулирована как задача классификации состояния системы и выбор управляющего воздействия в зависимости от класса состояния. Такие задачи могут быть решены, например, с помощью нечетких регуляторов или нейронных сетей [9].

Для обеспечения универсальности решения и возможности его применения на тепловых установках не зависимо от их мощности, в качестве системы адаптивного регулирования использована схема с добавлением параллельно нейронной сети, изменяющей параметры ПИД-регулирования [10] (рис. 4).

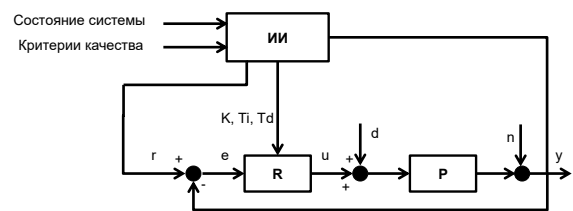


Рис.4. Схема нейросетевого управления

R – ПИД-регулятор; P – объект управления; r – управляющее воздействие; e – сигнал ошибки; u – сигнал регулятора; y – регулируемая величина; d – внешние возмущения; n – шум; K – пропорциональный коэффициент; T_i – интегральный коэффициент; T_d – дифференциальный коэффициент

Такая схема позволяет использовать стандартные схемы управления технологическими процессами без внесения существенных изменений в схему управления. Надстройка в виде нейронной сети может быть реализована на базе промышленного контроллера и, следовательно, можно существенно снизить стоимость внедрения такой интеллектуальной надстройки.

Для проверки возможности использования нейронной сети для построения адаптивного управления частотно-регулируемого электропривода в описанных выше условиях, была собрана экспериментальная установка. Было выполнено исследование эффективности применения системы с интеллектуальной адаптацией ПИД-регулирования в системах управления водогрейных котлов, возможность практического применения нейронных сетей в задаче адаптивного управления процессами выработки тепловой энергии.

Реализованная система управления частотно-регулируемого привода сетевого насоса, функциональная схема которого представлена на рис.5, состоит из трех уровней.

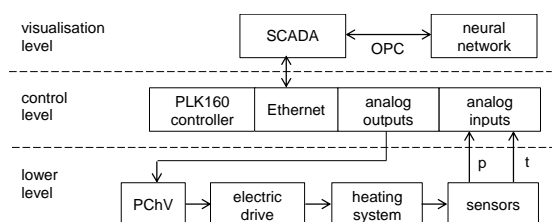


Рис.5. Функциональная схема управления

На нижнем уровне находились частотный преобразователь, датчики давления и температуры. Качество работы системы управления контролировалось путем независимого измерения производительности работы сетевого насоса ультразвуковым расходомером. Управляющий уровень представлен программируемым логическим контроллером ПЛК160, управляющим параметрами частотного регулятора. На уровне визуализации находился ноутбук с программной реализацией нейронной сети, написанной на языке C++, и взаимодействующей с SCADA системой через OPC-интерфейс посредством тэгов.

Основной задачей нейронной сети было определение на основе показаний датчиков давления и температуры теплоносителя в прямом и обратном трубопроводе оптимальных параметров ПИД-регулятора и эффективной уставки давления для исключения эффекта разрегулирования.

Ниже приведены результаты использования адаптивной системы управления для системы теплоснабжения (рис.6).

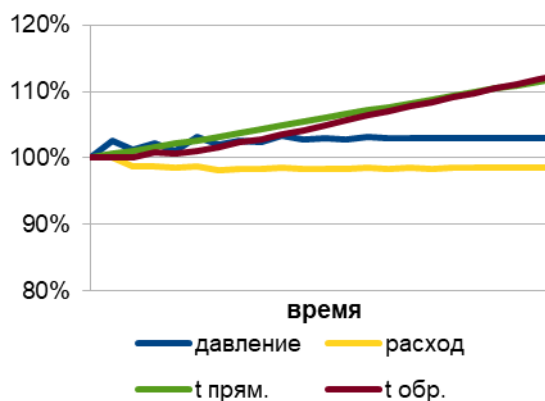


Рис.6. Показатели работы системы при реализованном адаптивном управлении

Адаптивное управление позволило решить проблему разрегулирования системы: нейронной сетью была автоматически подобрана новая уставка давления для ПИД-регулятора, которая позволила перейти в новый стационарный режим работы.

Закключение

Частотно-регулируемый электропривод насосов с ПИД-регулированием имеет ограниченное применение в системах отопления. Но поскольку внедрение частотного регулирования является основным способом повышения энергетической эффективности насосов, то необходимо использовать адаптивное управление, расширяющее возможности ПИД-регуляторов и позволяющие устранить эффект разрегулирования на описанных в статье режимах работы.

Предложенный способ адаптивного управления с использованием нейронной сети является одним из возможных. Он достаточно прост в реализации и является универсальным.

Предложенная схема адаптивного управления позволяет сгладить переходные процессы, в том числе исключить разрегулирование системы управления источником теплоснабжения в ситуациях быстрого изменения температуры теплоносителя в системе теплоснабжения

Литература

1. Артемов Г.К. Симонов Р.Р. Судовые центробежные насосы: конструкции и расчет: Уч. Пос. Владивосток Дальрыбвтуз, 2000.- 81 с.
2. Дайнеко, В. А. Эксплуатация электрооборудования и устройств автоматики: Учебное пособие / Дайнеко В.А., Забелло Е.П., Прищепова Е.М. - Москва :НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2015. - 333 с.
3. Shayeghi, H; Shayanfar, HA; Khazaraee, M. Area load frequency control using fuzzy PID type controller in a restructured power system. International Conference on Artificial Intelligence (ICAI 05). 2005 | ICAI '05: PROCEEDINGS OF THE 2005 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, VOLS 1 AND 2, pp.344-350
4. Shagapov, V. S. An increase of liquid pressure in enclosure under thermal effect through walls / V. S. Shagapov, Y. A. Yumagulova // Thermophysics and Aeromechanics. – 2013. – Vol. 20. – No 4. – P. 495-502. – DOI 10.1134/S0869864313040124.
5. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с. Ч. 2. 359 с.
6. Stepanov, M.F. Criteria of accuracy and quality in intellectual self-organizing automatic control systems / M.F. Stepanov, A.M. Stepanov // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 209-213. – DOI: 10.1016/J.PROCS.2017.01.066

- Zhou, GX (Zhou Guanxu); Wang, JX (Wang Jixiang); Ren, LJ (Ren Lanjie); Jinwoo, A (Jinwoo, Ahn). Adaptive PID Control for Hydraulic Pump System based on Fuzzy Logic. 2009 IEEE 6TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, VOLS 1-4. WOS:000277660000187
- Svensson, M.C. Model-based optimizing control of a water-to-water heat pump unit. MODELING IDENTIFICATION AND CONTROL. Vol.17, IS.4, p.279-295. WOS:A1996WG36900003
- Стельмашук С.В. Работа рулевого привода в следящем и позиционном режиме. МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. № 2 том 2 2021, с.73-79. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.055
- Gordin, S.A., Kozlova, O.V., Zaychenko, I.V. Modeling the combustion process of solid fuel boilers. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, 200/ - DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_15

References

- Artemov G.K., Simonov R.R. Sudovye tsentrobeznyye nasosy: konstruksii i raschet [Marine centrifugal pumps: design and calculation]: Uch. Pos. Vladivostok Dal'rybvuz, 2000.
- Dayneko V.A., Zabello E.P., Prishchepova E.M. Eksploatatsiya elektrooborudovaniya i ustroystv avtomatiki [Operation of electrical equipment and automation devices]: Uchebnoe posobie. Moskva :NITs INFRA-M, Nov. znanie, 2015.
- Shayeghi, H; Shayanfar, HA; Khazaraee, M. Area load frequency control using fuzzy PID type controller in a restructured power system. International Conference on Artificial Intelligence (ICAI '05). 2005 | ICAI '05: PROCEEDINGS OF THE 2005 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, VOLS 1 AND 2, pp.344-350
- Shagapov, V. S. An increase of liquid pressure in enclosure under thermal effect through walls / V. S. Shagapov, Y. A. Yumagulova // Thermophysics and Aeromechanics. – 2013. – Vol. 20. – No 4. – P. 495-502. – DOI 10.1134/S0869864313040124.
- Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]. V 2 ch. M.: Nauka, 1987. Ch. 1. 464 s. Ch. 2. 359 s.
- Stepanov, M.F., Stepanov A.M. Criteria of accuracy and quality in intellectual self-organizing automatic control systems. Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. DOI: 10.1016/J.PROCS.2017.01.066
- Zhou, GX (Zhou Guanxu); Wang, JX (Wang Jixiang); Ren, LJ (Ren Lanjie); Jinwoo, A (Jinwoo, Ahn). Adaptive PID Control for Hydraulic Pump System based on Fuzzy Logic. 2009 IEEE 6TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, VOLS 1-4. WOS:000277660000187
- Svensson, M.C. Model-based optimizing control of a water-to-water heat pump unit. MODELING IDENTIFICATION AND CONTROL. Vol.17, IS.4, p.279-295. WOS:A1996WG36900003
- Sergei V. Stelmashchuk Steering drive operation in tracking and positional mode. MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES. №2 2021, p.73-79. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.055
- Gordin, S.A., Kozlova, O.V., Zaychenko, I.V. Modeling the combustion process of solid fuel boilers. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, 200. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_15

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Александрович Гордин, кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладная математика, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: gordin@knastu.ru

Илья Владимирович Зайченко, кандидат технических наук, доцент кафедры Управление инновационными процессами и проектами, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: gordin@knastu.ru

Виктория Васильевна Бажеряну, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: gordin@knastu.ru

Ксения Дмитриевна Хряпенко, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: gordin@knastu.ru

Sergey A. Gordin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amur State University, Lenina, 27, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation, e-mail: gordin@knastu.ru

Ilya V. Zaychenko, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Management of innovative processes and projects, Komsomolsk-na-Amur State University, Lenina, 27, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation, e-mail: zaychenko@inbox.ru

Viktoriya V. Bazheryanu, graduate student, Komsomolsk-na-Amur State University, Lenina, 27, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation, e-mail: zaychenko@inbox.ru

Kseniya D. Khryapenko, student, Komsomolsk-na-Amur State University, Lenina, 27, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation, e-mail: vicarious024@mail.ru

Поступила в редакцию: 06.19.2021
Принята к публикации: 23.11.2021

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 338.27: 656.615

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.053>

Эконометрическая модель оценки взаимосвязей показателей эффективности деятельности стивидорной компании

М.В. Ботнарчук¹, e-mail: mia-marry@mail.ru, Н.Н. Ксензова¹, e-mail: natksenzova@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье с целью оптимизации процесса управления ресурсами обоснована необходимость разработки эконометрической модели, учитывающей отраслевую специфику предприятия. На ее основе управленческий аппарат получает возможность оценить взаимосвязи факторов эффективности деятельности стивидорной компании, что усиливает обоснованность принимаемых решений.

Цель исследования – построение эконометрической модели, позволяющей оценить тесноту взаимосвязи между показателями экономической эффективности хозяйственной деятельности стивидорной компании и измерить их взаимное влияние.

Методы исследования. В процессе проведения исследования были использованы устный опрос, корреляционно-регрессионный и дисперсионный анализ, статистическое наблюдение.

Результаты. В работе проведены исследования степени взаимного влияния показателей, характеризующих эффективность деятельности стивидорной компании. Информационная база сформирована посредством применения опроса, наблюдения, анализа статистических данных, что демонстрирует высокое качество собранного материала.

Заключение. В статье представлена авторская эконометрическая модель, применяемая для оценки взаимосвязей показателей эффективности деятельности стивидорной компании. На основании результатов проведенных исследований предложены общие рекомендации, реализация которых сформирует условия для роста эффективности работы предприятия. Предложенная модель отражает специфику ведущих предприятий портовой отрасли и может быть применена для оценки взаимосвязей показателей эффективности портовых терминалов.

Ключевые слова: стивидорная компания, двухшаговый метод наименьших квадратов, эконометрические модели, оценка взаимосвязей, эффективность деятельности, эндогенные и экзогенные факторы

Econometric model for evaluating correlation of performance indicators of a stevedoring company

Marina V. Botnaryuk¹, e-mail: mia-marry@mail.ru, Natalya N. Ksenzova¹, e-mail: natksenzova@mail.ru

¹Admiral F.F. Ushakov Maritime State University

Abstract. The article in order to optimize the resource management process is substantiated the need to develop an econometric model that takes into account the sectoral specifics of the enterprise. On the basis of its basis, the management apparatus is able to assess the relationship of the factors of the effectiveness of the stevedoring company, which increases the validity of the decisions made.

The purpose of the study is to build an econometric model that allows us to assess the relationship of the relationship between the indicators of the economic efficiency of the economic activity of the stevedoring company and measure their mutual influence.

Research methods. In the process of conducting research, an oral survey was used, correlation-regression and dispersion analysis, statistical observation.

Results. The paper conducted studies to the degree of mutual influence of indicators characterizing the effectiveness of the activities of the stevedoring company. The information base is formed by applying a survey, observation, analysis of statistical data, which demonstrates the high quality of the material collected.

Conclusion. The article presents the author's econometric model used to assess the relationship of the performance of the stevedoring company. Based on the results of the research, general recommendations were proposed, the implementation of which will form the conditions for the increase in the efficiency of the enterprise. The proposed model reflects the specifics of the leading enterprises of the port industry and can be applied to assess the relationship of the effectiveness of port terminals.

Key words: transport industry, digital economy, management system, ranking, indicators of achieving goals

Введение

Стивидорные компании, являясь ключевой береговой компонентой в логистической цепочке доставки грузов морем, оказывают значительное влияние на один из главных показателей качества обслуживания судозахода – время стоянки судна в порту. Учитывая, что именно данный показатель (как показывает опрос менеджеров стивидорных компаний) используется для оценки конкурентоспособности, как порта захода в целом,

так и отдельных компаний (в частности, выполняющих погрузочно-разгрузочные работы), очевидно, что исследование факторов экономической эффективности хозяйственной деятельности стивидорных компаний является актуальной задачей, решение которой позволит определить резервы ее роста. Безусловно, на временную составляющую обработки судна в порту, как правило, оказывает техническое оснащение и выбранная технология погрузочно-разгрузочных работ. Вместе с тем, именно наличие финансовых и

трудовых ресурсов, а также их грамотное распределение обеспечивает высокую вероятность безотказной и эффективной работы техники и персонала, что в итоге позволяет сократить стальнойное время [1]. В этой связи целью настоящей статьи является построение эконометрической модели, позволяющей оценить тесноту взаимосвязи между показателями экономической эффективности хозяйственной деятельности стивидорной компании и измерить их взаимное влияние. В качестве объекта исследования выбраны ведущие стивидорные компании Юга России (расположенные на территории Новороссийского порта, порта Туапсе и др. и обеспечивающие перевалку наливных, контейнерных и иных грузов, совокупный грузооборот которых составляет более 30% от грузооборота всех морских портов России [2]. Предметом исследования выступают показатели экономической эффективности хозяйственной деятельности стивидорных компаний. Период исследования составил 11 лет: 2010 – 2020 гг.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Определение набора эндогенных и экзогенных факторов, характеризующих эффективность функционирования стивидорной компании, установление связи между ними.

2. Разработка и решение эконометрической модели, статистическое оценивание ее параметров.

3. Оценка значимости и качества построенной эконометрической модели, проверка ее адекватности реальным взаимосвязям, оценка точности расчетов.

Структура проводимого научного исследования: в первом разделе описаны методы исследования, представлен обзор литературы по данному вопросу, проведена проверка выдвинутой авторами гипотезы, определены совокупность показателей эффективности деятельности стивидорной компании и теснота связи между ними. Во втором разделе представлена эконометрическая модель, применяемая для оценки взаимосвязей показателей эффективности деятельности стивидорной компании посредством определения наиболее значимых факторов. В заключении описаны выводы, предложены общие рекомендации, нацеленные на рост эффективности работы предприятия. Актуальность данной статьи обусловлена отсутствием трудов отечественных исследователей (отражающих специфику работы подобных предприятий в условиях российской действительности), посвященных эконометрическому моделированию взаимосвязей факторов эффективности деятельности стивидорной компании. Исключение составляет работа [3], в которой предложены эконометрические уравнения, используемые, исключительно, для прогнозирования грузооборота морского порта. В качестве методов, применяемых для изучения взаимосвязи показателей, характеризующих эффективность хозяйственной деятельности стивидорной компании, выбраны следующие: устный опрос топ-менеджеров (в качестве респондентов выступили руководители высшего звена управления стивидорных компаний г. Новороссийска), корреляционно-регрессионный и дисперсионный анализ, статистическое наблюдение.

1. Исследовательская часть

Оценка экономической эффективности уже изначально предполагает расчет относительных показателей, характеризующих результаты деятельности предприятия в различных областях: производственной, финансовой, управленческой, социальной, маркетинговой и др. Это обусловлено тем, что относительные показатели дают возможность сравнивать несопоставимые по абсолютным показателям явления и оценивать качественную составляющую деятельности хозяйствующего субъекта.

Многие авторы [4-9] в своих трудах рассматривают необходимость системного подхода и комплексной оценки эффективности в анализе деятельности предприятия, что требует использования системы показателей, характеризующих экономическое состояние организации. Однако при проведении комплексной оценки эффективности возникает сложность: в научной литературе предлагается множество показателей, поэтому на практике часто возникает сомнение в том, как построить наиболее приемлемую систему показателей эффективности. При этом стоит учитывать, что некоторые показатели по содержанию дублируют друг друга и тем самым затрудняют проведение экономического анализа. В связи с этим, одним из важнейших вопросов анализа является формирование такой системы показателей, которая позволила бы быстро, достоверно и в полном объеме провести оценку состояния исследуемого объекта с учетом специфики его деятельности, что обеспечит результативное решение поставленных менеджментом компании задач в кратчайшие сроки. Для этого, по мнению авторов статьи, необходимо изучить тесноту связей между детерминантами успешного функционирования предприятия.

Современная стивидорная компания представляет собой сложную целостную систему, которая характеризуется совокупностью элементов с определенными свойствами и сложившимися взаимосвязями. Для оценки эффективности ее деятельности и определения целей развития используется система ключевых показателей и причинно следственных взаимосвязей между ними. Поэтому обеспечение согласованности указанных составляющих является одной из основных задач проведения диагностики и оценки эффективности. В контексте поставленной задачи возникает необходимость построения концептуальной модели, отображающей взаимосвязи между факторами и элементами, составляющими организационно-функциональную структуру предприятия.

Комплексная оценка эффективности деятельности стивидорной компании основана на анализе ресурсного, рыночного и экономического потенциалов и ее способности к их эффективному использованию с целью получения желаемого результата в виде повышения доходности. Оценка взаимосвязей (как прямых, так и обратных) необходима в анализе эффективности предприятия, так как это дает возможность оценить его настоящее экономическое состояние, прогнозировать изменение связей и их воздействие на ключевые показатели с целью определения направлений дальнейшего повышения эффективности деятельности и развития организации. Произвести

такую оценку взаимосвязей между относительными показателями эффективности деятельности стивидорной компании предлагается методами корреляционно-регрессионного моделирования.

Обобщение изложенного выше материала позволило выдвинуть гипотезу: переменные по своим численным значениям обобщающие (результативные) показатели эффективности стивидорной компании находятся в зависимости от ряда финансовых, производственных и иных факторных показателей, характеризующих ее деятельность, и во взаимосвязи между собой.

С целью проверки выдвинутой гипотезы проведен ряд исследований, в ходе которых определены совокупность показателей эффективности деятельности стивидорной компании и теснота связи между ними; разработана эконометрическая модель оценки взаимосвязей; произведена оценка качества и адекватности модели.

В таблицах 1-3 приведена матрица парных коэффициентов корреляции, определяющих характер, силу и направление связи между результативными и факторными признаками, а также межфакторную корреляцию.

Таблица 1

Сводная матрица рангов

	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
Y ₁	1,00				
Y ₂	0,80	1,00			
Y ₃	-0,94	-0,62	1,00		
Y ₄	0,70	0,66	-0,67	1,00	
Y ₅	0,68	0,83	-0,60	0,81	1,00
X ₁	0,33	0,37	-0,28	0,22	0,46
X ₂	0,55	0,47	-0,41	0,31	0,33
X ₃	-0,10	0,28	0,03	-0,11	0,41
X ₄	0,35	0,48	-0,38	0,87	0,65
X ₅	0,95	0,69	-0,92	0,84	0,80
X ₆	0,16	0,31	-0,20	-0,23	0,06
X ₇	0,24	0,12	-0,23	0,81	0,45
X ₈	0,11	0,13	-0,18	0,51	0,23
X ₉	-0,14	-0,21	0,20	-0,08	-0,13
X ₁₀	0,54	0,78	-0,58	0,21	0,61
X ₁₁	0,16	0,32	-0,21	-0,23	0,06
X ₁₂	-0,63	-0,49	0,70	-0,45	-0,26
X ₁₃	-0,40	-0,34	0,36	-0,29	-0,28
X ₁₄	-0,84	-0,79	0,68	-0,68	-0,63
X ₁₅	-0,32	0,11	0,24	0,24	0,39
X ₁₆	0,29	0,57	0,67	0,67	0,70

Таблица 2

Сводная матрица рангов

	X ₁	X ₂	...	X ₆	X ₇	X ₈
X ₁	1,00		...			
X ₂	0,33	1,00	...			
X ₃	0,48	-0,07	...			
X ₄	0,11	0,10	...			
X ₅	0,30	0,49	...			
X ₆	0,05	-0,05	...	1,00		
X ₇	0,01	0,01	...	-0,51	1,00	
X ₈	-0,50	-0,06	...	-0,29	0,59	1,00
X ₉	0,21	-0,02	...	-0,21	0,02	-0,11
X ₁₀	0,41	0,40	...	0,50	-0,34	-0,17
X ₁₁	0,05	-0,05	...	0,99	-0,51	-0,29
X ₁₂	0,02	-0,46	...	-0,26	-0,20	-0,10
X ₁₃	-0,23	-0,21	...	-0,29	-0,16	0,23
X ₁₄	-0,26	-0,35	...	0,06	-0,56	-0,39
X ₁₅	0,10	-0,16	...	-0,03	0,31	0,22
X ₁₆	0,13	-0,01	...	0,32	0,53	0,36

Таблица 3

Сводная матрица рангов (продолжение)

	X ₉	X ₁₀	...	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
X ₉	1,00		...			
X ₁₀	-0,18	1,00	...			
X ₁₁	-0,21	0,50	...			
X ₁₂	0,37	-0,14	...			
X ₁₃	0,36	-0,04	...			
X ₁₄	0,15	-0,43	...	1,00		
X ₁₅	-0,04	0,13	...	-0,04	1,00	
X ₁₆	-0,22	0,33	...	-0,52	0,65	1,00

В работе в качестве результирующих выбраны следующие относительные показатели эффективности деятельности стивидорной компании:

Y₁ – рентабельность продукции (затрат), руб./руб.;

Y₂ – фондоотдача, руб./руб.;

Y₃ – затраты на один рубль выручки, руб./руб.;

Y₄ – производительность труда (выработка), тыс. руб./чел.;

Y₅ – прибыль в расчете на одного работника аппарата управления, тыс. руб./чел.

Переменными (факторными), формирующими численное значение результирующего показателя, определены следующие:

X₁ – оборачиваемость оборотных средств, руб./руб.;

X_2 – рентабельность собственного капитала, руб./руб.;

X_3 – рентабельность активов, руб./руб.;

X_4 – среднемесячная заработная плата, руб./чел.;

X_5 – рентабельность персонала (определяется отношением прибыли к фонду заработной платы), руб./руб.;

X_6 – доля расходов на оплату труда в общем объеме затрат, отн. ед.;

X_7 – фондовооруженность, тыс. руб./чел.;

X_8 – вооруженность оборотными средствами, тыс. руб./чел.;

X_9 – коэффициент финансовой устойчивости, отн. ед.;

X_{10} – амортизационная нагрузка (определяется отношением выручки к сумме амортизации), руб./руб.;

X_{11} – удельный вес расходов на содержание аппарата управления в общем объеме затрат на производство, отн. ед.;

X_{12} – коэффициент финансовой независимости, отн. ед.;

X_{13} – коэффициент ликвидности, отн. ед.;

X_{14} – зарплатоемкость (определяется отношением фонда заработной платы к выручке), руб./руб.;

X_{15} – себестоимость перегрузки 1-ой тонны груза (определяется отношением затрат к объему грузопереработки), руб./т.;

X_{16} – затраты на содержание аппарата управления в расчете на одного работника стивидорной компании, тыс. руб. чел.

Расчет показателей произведен в текущих ценах рассматриваемого периода, совокупность показателей выбрана на основе опроса топ-менеджеров компаний, исследования отчетных данных стивидорных компаний [10,11], а также собственных наблюдений авторов. Для оценки взаимосвязей использовалась модель множественной регрессии, построение которой производилось с использованием ППП Excel. Модель множественной регрессии построена на использовании 40 наблюдений, включающих данные статистической и финансовой отчетности о деятельности нескольких крупных стивидорных компаний Юга России за период времени 2010-2020 гг.

Согласно полученным результатам (таблицы 1-3), можно говорить о наличии взаимосвязей между определенными переменными, что частично подтверждает выдвинутую авторами гипотезу.

В первую очередь необходимо отметить максимально тесную связь между результирующими показателями. Согласно рассчитанным значениям коэффициента парной корреляции и его качественной интерпретации по шкале Чеддока, можно охарактеризовать связь между показателями эффективности как очень высокую (коэффициент корреляции находится в пределах 0,75 – 1,00) и высокую (от 0,5 до 0,74). Между показателями присутствует как прямая, так и обратная связь, что подтверждается положительными и отрицательными величинами коэффициента корреляции. И, что самое важное, – это наличие взаимного влияния результирующих показателей друг на друга, оценка которого является следующим этапом данного научного исследования.

Вместе с тем, необходимо отметить, что имеются такие факторные переменные, которые особого влияния на формирование и изменение результирующих показателей не оказывают. Это, в первую очередь, показатели эффективности оборотного капитала и показатели финансового состояния предприятия: оборачиваемость оборотных средств (X_1), рентабельность собственного капитала (X_2), рентабельность активов (X_3), вооруженность оборотными средствами (X_8), коэффициент финансовой устойчивости (X_9), коэффициент ликвидности (X_{13}), себестоимость перегрузки одной тонны груза (X_{15}) и др. Для перечисленных показателей парные коэффициенты корреляции с результирующими признаками принимают значения гораздо ниже 0,5, что характеризует их связь как среднюю или слабую.

Соответственно, возникает ряд вопросов, на которые можно получить достаточно интересные ответы. Например, с экономической точки зрения сложно пояснить, почему на рентабельность продукции не оказывает влияние себестоимость перегрузки одной тонны груза, хотя именно она является базисом формирования цены. В данном случае следует отметить, что это происходит из-за сильной рыночной власти продавца, вследствие чего компания устанавливает выгодные для себя цены, получая очень высокую прибыль – до 180% [10]. И совсем не случайно многие стивидорные компании Юга России относятся к субъектам естественных монополий, вопросы ценообразования которых находятся под контролем государственных структур.

При оценке тесноты связи между результирующим показателем рентабельности продукции и другими переменными ($X_1...X_{16}$) также получены неожиданные результаты. Согласно априорным ожиданиям, должна существовать тесная зависимость рентабельности продукции с показателями себестоимости перегрузки одной тонны груза, показателями, характеризующими эффективность использования оборотных активов и финансовое состояние предприятия. Тем не менее, по результатам корреляционного анализа установлена высокая зависимость рентабельности продукции от показателей фондотдачи и производительности труда, рентабельности персонала и показателя зарплатоемкости.

Следующая переменная – коэффициент автономии, который показывает долю собственных средств в структуре источников предприятия. В данном случае выявлена обратная корреляционная связь: чем выше значения коэффициента автономии, тем ниже рентабельность продукции. На первый взгляд очевиден парадокс: обеспеченность собственными денежными средствами оказывает негативное влияние на результирующий показатель, характеризующий успешность оказания услуги. Тем не менее, обработка статистических данных за ряд лет по нескольким крупнейшим стивидорным компаниям и применяемая для расчетов математическая модель – достаточно веские аргументы, требующие более детального исследования данного несоответствия.

Обратимся к экономической трактовке рентабельности: показатель характеризует долю полученной от проданных услуг прибыли с одной денежной единицы, которая была затрачена на

производство. Пояснения, приведенные ранее, объясняют причину слабого влияния себестоимости на результирующие показатели рентабельности. Также становится очевидным, что значительное количество собственных денежных средств, размещенных на расчетных счетах предприятия, не дают гарантии роста эффективности производства. Это подтверждает один из ключевых законов бизнеса: деньги должны работать и приносить доход, т.е. их надо вкладывать, в том числе в обновление и совершенствование основных производственных фондов (данное утверждение является постулатом, в первую очередь для стивидорных компаний, что установлено на основании изучения опыта их деятельности в течение ряда лет). При этом стоит особо подчеркнуть: необходимо соблюдать некоторый баланс, поскольку вследствие отраслевых особенностей продажи стивидорных услуг необдуманное с точки зрения экономической целесообразности вложение денежных средств в производство не обеспечит его максимальную эффективность. Рост должен быть интенсивным, а не экстенсивным. Поэтому, принимая управленческие решения в сфере финансовых инвестиций, следует всегда помнить о том, что далеко не всегда увеличение одного показателя способствует росту значений другого.

Таким образом, основными факторами, определяющими уровень результирующих показателей эффективности деятельности стивидорной компании, являются:

- среднемесячная заработная плата работников (X_4);
- рентабельность персонала (X_5);
- фондовооруженность (X_7);
- амортизационная нагрузка (X_{10});
- коэффициент финансовой независимости (X_{12});
- зарплатоемкость (X_{14});
- затраты на содержание аппарата управления в расчете на одного работника стивидорной компании (X_{16}).

Методом последовательного включения факторов в модель были построены уравнения множественной регрессии зависимости результирующих показателей эффективности от показателей, принятых в качестве экзогенных переменных. Проведенная проверка факторных признаков на мультиколлинеарность и статистическую значимость по критерию Стьюдента позволила выявить и исключить из эконометрической модели факторы, не отвечающие данным требованиям. При построении эконометрических моделей в виде отдельных уравнений множественной регрессии предполагается, что экзогенные переменные, включенные в модель, являются статистически независимыми и изменение одних не влечет за собой изменение других переменных [12]. Реальный производственный процесс, реализуемый в морских портах, характеризуется довольно сложными взаимосвязями, когда даже малейшее изменение одной характеристики этого процесса может повлечь изменение всей системы производственно-экономических показателей, определяющих эффективность деятельности всей стивидорной компании. Из сказанного следует, что на основе построения отдельно взятого уравнения

множественной регрессии нельзя смоделировать и оценить силу влияния факторов на изменение результирующего признака.

2. Результаты. Эконометрическая модель оценки взаимосвязей показателей эффективности деятельности стивидорной компании

Сложные экономические системы и процессы, какой является современная стивидорная компания, описывают с помощью системы эконометрических взаимосвязанных (одновременных) уравнений. Для моделирования взаимосвязей, установленных на этапе проведенного корреляционного анализа, применена структурная форма, в которой в качестве модели используется система взаимосвязанных (совместных) уравнений – когда одни и те же зависимые переменные в одних уравнениях входят в левую часть, а в других – в правую. На основании вышеприведенных заключений эконометрическая модель для оценки эффективности деятельности стивидорной компании принимает следующий вид:

$$\begin{cases} Y_1 = b_{12} Y_2 + b_{13} Y_3 + b_{14} Y_{24} + a_{15} X_5 + a_{1,14} X_4 \\ Y_2 = b_{21} Y_1 + b_{23} Y_3 + b_{25} Y_5 + a_{2,10} X_{10} + a_{2,14} X_{14} \\ Y_3 = b_{31} Y_1 + a_{35} X_5 + a_{3,10} X_{10} + a_{3,12} X_{12} \\ Y_4 = b_{41} Y_1 + b_{42} Y_2 + a_{44} X_4 + a_{45} X_5 + a_{47} X_7 \\ Y_5 = b_{52} Y_2 + b_{54} Y_4 + a_{55} X_{5,15} + a_{56} X_{5,16} \end{cases}$$

При построении эконометрической модели в виде системы одновременных уравнений в обязательном порядке должна проводиться проверка системы на выполнение требований идентификации, в соответствии с которыми:

$D + 1 = N$ – уравнение признается идентифицируемым;

$D + 1 < N$ – уравнение признается неидентифицируемым;

$D + 1 > N$ – уравнение признается сверхидентифицируемым,

где N – число эндогенных (результирующих) переменных в уравнении;

D – число predetermined (факторных) переменных, отсутствующих в уравнении, но присутствующих в системе.

Проверка показала, что все пять уравнений системы сверхидентифицируемы, поэтому для их решения может быть применен двухшаговый метод наименьших квадратов.

В работе составлена приведенная форма модели и определены численные значения параметров каждого уравнения обычным МНК (расчеты производились с использованием ППП Excel, рис. 1):

$$\begin{cases} Y_1 = -2,2114 + 0,4492 X_5 - 0,1120 X_{14} \\ Y_2 = 1,2474 + 0,0606 X_{10} - 6,4202 X_{14} \\ Y_3 = 0,6656 - 0,0334 X_5 - 0,0078 X_{10} + 0,0923 X_{12} \\ Y_4 = -2799,6769 + 0,0773 X_4 + 535,0587 X_5 + 0,3887 X_7 \\ Y_5 = -3706,6418 + 1469,7574 X_5 + 21,3145 X_{16} \end{cases}$$

Рис. 1. Приведенная форма эконометрической модели и численные значения параметров каждого уравнения

Оценка статистической значимости каждого уравнения множественной регрессии показала следующее. Для уравнения Y_1 :

- значение индекса множественной корреляции

$R_1 = 0,97$ подтверждает наличие высокой связи между Y_1 и факторными признаками X_5 и X_{14} ;

- коэффициенты уравнения регрессии являются статистически значимыми при уровне значимости $\alpha=0,05$;

- оценка значимости уравнения регрессии с помощью F-критерия Фишера показала превышение расчетного значения ($F_{расч} = 313,1$) над критическим значением ($F_{табл} = 3,26$), что позволяет принять гипотезу о статистической значимости модели;

- хорошее качество модели характеризует также средняя ошибка аппроксимации, равная 10,3%.

Для уравнения Y_2 :

- значение индекса множественной корреляции

$R_2 = 0,95$ подтверждает наличие высокой связи между Y_2 и факторными признаками X_{10} и X_{14} ;

- коэффициенты уравнения регрессии являются статистически значимыми при уровне значимости $\alpha=0,05$;

- оценка значимости уравнения регрессии с помощью F-критерия Фишера показала превышение расчетного значения ($F_{расч} = 119,9$) над критическим значением ($F_{табл} = 3,26$), что позволяет принять гипотезу о статистической значимости модели;

- хорошее качество модели характеризует также средняя ошибка аппроксимации, равная 9,5%.

Для уравнения Y_3 :

- значение индекса множественной корреляции $R_3 = 0,93$ подтверждает наличие высокой связи между Y_3 и факторными признаками X_5 , X_{10} и X_{12} ;

- коэффициенты уравнения регрессии являются статистически значимыми при уровне значимости $\alpha=0,05$;

- оценка значимости уравнения регрессии с помощью F-критерия Фишера показала превышение расчетного значения ($F_{расч} = 108,2$) над критическим значением ($F_{табл} = 2,95$), что позволяет принять гипотезу о статистической значимости модели;

- хорошее качество модели характеризует также средняя ошибка аппроксимации, равная 6,72%.

Для уравнения Y_4 :

- значение индекса множественной корреляции $R_4 = 0,93$ подтверждает наличие высокой связи между Y_4 и факторными признаками X_4 , X_5 и X_7 ;

- коэффициенты уравнения регрессии являются статистически значимыми при уровне значимости $\alpha=0,05$;

- оценка значимости уравнения регрессии с помощью F-критерия Фишера показала превышение расчетного значения ($F_{расч} = 922,2$) над критическим значением ($F_{табл} = 2,95$), что позволяет принять гипотезу о статистической значимости модели;

- хорошее качество модели характеризует также средняя ошибка аппроксимации, равная 5,60%.

Для уравнения Y_5 :

- значение индекса множественной корреляции $R_5 = 0,89$ подтверждает наличие высокой связи между Y_5 и факторными признаками X_5 и X_{16} ;

- коэффициенты уравнения регрессии являются статистически значимыми при уровне значимости $\alpha=0,05$;

- оценка значимости уравнения регрессии с помощью F-критерия Фишера показала превышение расчетного значения ($F_{расч} = 70,5$) над критическим значением ($F_{табл} = 3,26$), что позволяет принять гипотезу о статистической значимости модели;

- хорошее качество модели характеризует также средняя ошибка аппроксимации, равная 11,60%.

Делаем общий вывод: представленные выше уравнения множественной регрессии признаются надежным и значимым. Далее определяем коэффициенты структурной формы эконометрической модели системы одновременных уравнений. В этой системе в качестве переменных Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 и Y_5 , находящихся в правых частях уравнений, будем использовать их теоретические значения $\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \hat{Y}_3, \hat{Y}_4$ и \hat{Y}_5 , рассчитанные по формулам приведенных уравнений (рис. 2):

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 &= 2,2514 + 0,1926Y_2 - 4,7976Y_3 + 0,003Y_4 + 0,4325X_5 - 0,0917X_{14} \\ \hat{Y}_2 &= 0,4840 + 0,1697Y_1 - 2,0490Y_3 + 0,0003Y_5 + 0,0417X_{10} - 0,0850X_{14} \\ \hat{Y}_3 &= 0,6495 - 0,1048Y_1 - 0,0616X_5 - 0,0083X_{10} + 0,1128X_{12} \\ \hat{Y}_4 &= -2886,74 + 224,2538Y_1 - 0,0083Y_5 + 0,0810X_4 + 478,4284X_5 + 0,3794X_7 \\ \hat{Y}_5 &= 6079,16 + 9458,85Y_2 + 0,9936Y_4 - 371,03X_5 + 5,56X_{16} \end{aligned}$$

Рис. 2. Коэффициенты структурной формы эконометрической модели системы одновременных уравнений

Обобщив представленные выше расчеты, выполненные на основе двухшагового метода наименьших квадратов, в работе представлены эконометрические модели (система приведенных уравнений и структурная форма), устанавливающие взаимосвязи между эндогенными и экзогенными факторами.

Заключение

Применив экономическую интерпретацию коэффициентов уравнений множественной регрессии, сформулированы следующие выводы в рамках оценки взаимосвязей между показателями экономической эффективности деятельности стивидорной компании:

1. Увеличение показателя фондоотдачи на одну единицу приводит к росту рентабельности продукции в среднем на 0,192 единицы; увеличение затрат на один рубль выручки на единицу снижает рентабельность продукции на 4,7976 единицы; рост производительности труда на 1000 руб. повлечет прирост рентабельности на 0,003 единицы; прирост показателя рентабельности персонала приведет к росту рентабельности продукции на 0,4325 ед., а зарплатоемкость снизит рентабельность на 0,0917 ед.

2. Увеличение показателя рентабельности на одну единицу приводит к росту фондоотдачи в среднем на 0,1697 единицы; увеличение затрат на один рубль выручки на единицу снижает фондоотдачу на 2,0490 единицы; рост эффективности труда управленческого персонала приводит к росту фондоотдачи на 0,0003 ед., а увеличение показателя амортизациоотдачи обеспечил рост фондоотдачи на 0,0417 ед., рост зарплатоемкости на единицу приводит к снижению фондоотдачи на 0,085 ед.

3. При росте показателей рентабельности продукции, рентабельности персонала и амортизациоотдачи на одну единицу, затраты уменьшаются на 0,1048, 0,0616 и 0,0083 единицы соответственно, а прирост коэффициента финансовой независимости вызывает увеличение затрат на 0,1128 ед.;

4. При увеличении рентабельности продукции на единицу, выработка повысится на 224,2538 тыс. руб.,

а рост прибыли на одного работника аппарата управления, напротив, снизит производительность труда на 0,0083 тыс. руб. Увеличение оплаты труда на 1000 руб. обеспечивает рост выработки всего на 810 руб., вместе с тем, при повышении рентабельности персонала на единицу выработка растет на 478,43 руб., а рост фондовооруженности на 1000 руб. приведет к росту производительности на 379,4 рубля.

4. Увеличение показателя фондоотдачи и рост производительности труда за счет совершенствования руководства производственным процессом может обеспечить прирост прибыли в размере 9458 руб. и 993,6 руб. соответственно. Но повышение рентабельности персонала на единицу снижает величину прибыли на 371 руб. При этом анализ показывает, что между показателем прибыли на одного работника управления и показателем затрат на содержание аппарата управления в расчете на одного работника стивидорной компании существует прямая связь, т.е. с увеличением затрат на 1000 руб. прибыль предприятия растет на 5560 на одного работника управления.

На основании результатов такой оценки разрабатываются рекомендации, необходимые для грамотного управления предприятием. В частности, руководящим структурам рассматриваемых в работе стивидорных компаниях можно порекомендовать взять на особый контроль затраты и, в частности, заработную плату сотрудников компании. Это связано с тем, что рост зарплатоемкости не дает ожидаемых результатов, но снижает рентабельность и фондоемкость. Вместе с тем, при росте затрат на

работников аппарата управления наблюдается увеличение прибыли (на одного работника управления). Также следует обратить внимание на то, что рост такого показателя как фондовооруженность не обеспечивает увеличение значений производительности труда на том же уровне. В этом случае нет очевидной необходимости оснащать рабочие места слишком дорогим оборудованием. При его закупках рекомендуется делать акцент на соотношении цены и производственной потребности в том или ином технологическом оснащении производственного процесса, что позволит перенаправить высвободившиеся финансовые потоки в иные области (например, инвестирование в ценные бумаги).

Таким образом, заключаем следующее. Использование предложенной авторами эконометрической модели в качестве управленческого инструмента позволит оптимизировать работу менеджеров за счет более точного распределения ресурсов компании, что обосновывает ее значимость.

Особо отметим, что сегодня многие авторы делают акцент на нейромоделирование, которое позволяет реализовать новые подходы к прогнозированию некоторых процессов [13]. Авторы статьи полагают, что представленная в данной работе

эконометрическая модель в дальнейшем может быть усовершенствована на основе теории нейронных сетей с целью получения более точных прогнозных результатов.

Литература

1. Головань Т.В. Пошаговый алгоритм по определению и расчету стальной времени при фрахтовании судна морскими фрахтовыми брокерами. Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2021, № 2 (35), С. 32-36.
2. Информационно-аналитический бюллетень «Морцентр-ТЭК» [Электронный ресурс] URL: <https://morcenter.ru/informacionno-analiticheskie-dannye> (дата обращения 14.08.2021).
3. Аблязов В.К. Разработка системы независимых эконометрических уравнений для прогнозирования грузооборота новороссийского порта. Казанская наука, 2011, № 9, С.30-32.
4. Дербичева А. А. Формирование модели анализа финансового результата деятельности организации. Учет. Анализ. Аудит, 2018, № 2, С. 60–71.
5. Доронина Ф.Х. Интегральный подход в комплексной оценке эффективности деятельности предприятия. Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. [Электронный ресурс] URL: <https://docplayer.ru/59646488-Integralnyy-podhod-v-kompleksnoy-ocenke-effektivnosti-deyatelnosti-predpriyatiya.html>. (дата обращения 14.08.2021).
6. Зыкова Н.В. Исследование подходов к оценке эффективности деятельности организации. [Электронный ресурс] URL: <https://ekonomika.snauka.ru/2014/12/6529> (дата обращения 14.08.2021).
7. Князева Е. В., Шаповал Е.В. Эффективность деятельности предприятия и факторы, влияющие на нее. Вестник ГУУ 2018, № 2, С.12–115.
8. Кремер Н.Ш., Путко Б.А. Эконометрика: учебник для студентов вузов. 3-е изд. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2018, 308 с.
9. Шерemet А.Д., Негашев Е.В. Методика финансового анализа деятельности коммерческих организаций. 2-изд., перераб. и доп. М., Инфра-М, 2013, 208 с.
10. Группа НМТП [Электронный ресурс] URL: <http://www.nmtp.info/> (дата обращения 14.08.2021).
11. Туапсинский морской торговый порт [Электронный ресурс] URL: <http://www.tmtp.ru/> (дата обращения 14.08.2021).
12. Greene W. H. Econometric analysis. 7 ed., Stern School of Business, New York University, 2012, 240 p.
13. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Прогнозирование многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования. Морские интеллектуальные технологии, 2020, №4-4 (50), С.23-27.

References

1. Golovan' T.V. Poshagovyy algoritm po opredeleniyu i raschetu stal'nogo vremeni pri frahtovanii sudna morskimi frahtovymi brokerami. Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admiral-a F.F. Ushakova, 2021, № 2 (35), S. 32-36.
2. Informacionno-analiticheskij byulleten' «Morcentr-TEK» [Elektronnyj resurs] URL: <https://morcenter.ru/informacionno-analiticheskie-dannye> (data obrashcheniya 14.08.2021).
3. Ablyazov V.K. Razrabotka sistemy nezavisimyh ekonometricheskikh uravnenij dlya prognozirovaniya gruzooborota novorossijskogo porta. Kazanskaya nauka, 2011, № 9, S.30-32.
4. Derbicheva A. A. Formirovanie modeli analiza finansovogo rezul'tata deyatel'nosti organizacii. Uchet. Analiz. Audi, 2018, № 2, S. 60–71.
5. Doronina F.H. Integral'nyj podhod v kompleksnoj ocenke effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiya. Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S.YU. Vitte. [Elektronnyj resurs] URL: <https://docplayer.ru/59646488-Integralnyy-podhod-v-kompleksnoy-ocenke-effektivnosti-deyatelnosti-predpriyatiya.html>. (data obrashcheniya 14.08.2021).
6. Zykova N.V. Issledovanie podhodov k ocenke effektivnosti deyatel'nosti organizacii. [Elektronnyj resurs] URL: <https://ekonomika.snauka.ru/2014/12/6529> (data obrashcheniya 14.08.2021).
7. Knyazeva E. V., SHapoval E.V. Effektivnost' deyatel'nosti predpriyatiya i faktory, vliyayushchie na nee. Vestnik GUU, 2018, № 2, S.12–115.
8. Kremer N.SH., Putko B.A. Ekonometrika: uchebnik dlya studentov vuzov. 3-e izd. M., YUNITI-DANA, 2018, 308 s.
9. SHeremet A.D., Negashev E.V. Metodika finansovogo analiza deyatel'nosti kommercheskih organizacij. 2-izd., pererab. i dop. M., Infra-M, 2013, 208 s.
10. Gruppya NMTP [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.nmtp.info/> (data obrashcheniya 14.08.2021).
11. Tuapsinskij morskoy trgovyj port [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.tntp.ru/> (data obrashcheniya 14.08.2021).
12. Greene W. H. Econometric analysis. 7 ed., Stern School of Business, New York University, 2012, 1240 r.
13. Epihin A.I., Kondrat'ev S.I., Hekert E.V. Prognozirovanie mnogomemykh nestacionarnykh vremennykh ryadov s ispol'zovaniem nejromodelirovaniya. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2020, №4-4 (50), S.23-27

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Марина Владимировна Ботнарюк, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономической теории, экономики и менеджмента, Государственный морской университет, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: mia-marry@mail.ru

Marina V. Botnaryuk, Dr. Sci. (Econ.), assistant professor, Professor of the economic theory, economics and management Department, maritime state University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: mia-marry@mail.ru

Наталья Николаевна Ксензова, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономической теории, экономики и менеджмента, Государственный морской университет, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: natksenzova@mail.ru

Natalya N. Ksenzova, Ph.D. (Econ), assistant professor, assistant professor of the economic theory, economics and management Department, maritime state University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: natksenzova@mail.ru

Поступила в редакцию: 06.09.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

Оптимальное управление ростом эффективности производственных предприятий

Т.Г. Айгунов¹, e-mail: 915533@mail.ru, В.Б. Мелехин¹, e-mail: pashka1602@rambler.ru

¹Дагестанский государственный технический университет

Аннотация. Сформулированы две ключевые задачи, связанные с повышением эффективности производственных предприятий на основе оптимального управления качеством и снижением себестоимости производимой продукции. Решение первой задачи сводится к допустимому росту качества производимой предприятием продукции путем ее модернизации с учетом покупательской способности основной массы потребителей на различных сегментах рынка. Приведен критерий позволяющий определить оптимальные объемы производства продукции с различным уровнем качества для различных сегментов рынка, обеспечивающие производственному предприятию получение максимально возможной прибыли за счет роста потребительских свойств производимой продукции и повышения на этой основе ее рыночной стоимости. Решение второй задачи связано с условной минимизацией переменных издержек производства без потери требуемого уровня качества различных видов производимой предприятием продукции, которая обеспечивается путем сбалансированного ввода факторов производства в производственный процесс. Такой ввод факторов производства сопровождается снижением себестоимости производимой предприятием продукции и получением на этой основе дополнительной прибыли. Для проведения условной оптимизации, когда решение задачи оптимального управления получением дополнительной прибыли находится на границе области допустимых значений вводимых в него факторов, приводится критерий определяющий условие сбалансированного их ввода в производственный процесс и снижения на этой основе переменных издержек производства различных видов продукции в краткосрочном периоде.

Ключевые слова: производственное предприятие, критерий оптимальности, оптимальные объемы производства, сбалансированный ввод факторов производства, эффективность производственного предприятия.

Optimal management of efficiency gains manufacturing enterprises

Timur G. Aygumov¹, e-mail: 915533@mail.ru, Vladimir B. Melekhin¹, e-mail: pashka1602@rambler.ru

¹Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

Abstract. Two key tasks have been formulated related to improving the efficiency of manufacturing enterprises based on optimal quality management and reducing the cost of production. The solution to the first problem is reduced to an acceptable increase in the quality of the products produced by the enterprise by means of its modernization, taking into account the purchasing power of the bulk of consumers in various market segments. A criterion is given that allows you to determine the optimal production volumes of products with different levels of quality for different market segments, providing a manufacturing enterprise to obtain the maximum possible profit due to the growth of consumer properties of the products produced and on this basis increase its market value. The solution of the second problem is associated with the conditional minimization of variable production costs without losing the required level of quality of various types of products produced by the enterprise, which is ensured by balanced input of production factors into the production process. This input of factors of production is accompanied by a decrease in the cost of products manufactured by the enterprise and the receipt of additional profit on this basis. To carry out conditional optimization, when the solution to the problem of optimal control for obtaining additional profit is on the border of the region of admissible values of the factors introduced into it, a criterion is given that determines the condition for their balanced input into the production process and, on this basis, reduce the variable production costs of various types of products in the short term.

Key words: manufacturing enterprise, profit management, optimality criterion, optimal production volumes, balanced input of production factors in the short term. efficiency of a manufacturing enterprise.

Введение

Устойчивое получение максимально возможной прибыли за счет роста качества продукции и снижения издержек производства является одним из основных путей повышения эффективности функционирования и развития производственных предприятий (ПП) в условиях современного рынка [1]. Иначе говоря, к основным источникам роста эффективности функционирования ПП, можно отнести решение следующих двух ключевых задач оптимального управления:

– повышением качества продукции реализуемой на различных по покупательской способности сегментах рынка при минимальных затратах на его обеспечение;

– снижением издержек производства в процессе повышения качества производимой продукции, реализуемой на различных сегментах рынка.

При решении первой обозначенной выше задачи, увеличение получаемой ПП прибыли, как правило, обеспечивается за счет допустимого роста стоимости реализуемой на рынке продукции, связанного с обеспечением ее заданных потребительских свойств. Во втором случае, сокращение издержек производства приводит к снижению себестоимости производимой продукции, что сопровождается повышением получаемой ПП прибыли.

Следовательно, для роста эффективности работы ПП, с одной стороны, возникает необходимость в постановке и решении задачи оптимального управления объемами производства

различной продукции требуемого качества для каждого сегмента рынка с учетом покупательской способности потребителей, которые будут ими востребованы. С другой стороны, необходимо решить задачу управления сбалансированным вводом в производственный процесс различных факторов производства, что позволяет минимизировать его издержки и на этой основе получить дополнительную прибыль.

Постановке и решению отмеченных выше задач оптимального управления повышением эффективности ПП и посвящается настоящая работа.

1. Оптимальное управление повышением качества производимой продукции как фактора повышения эффективности производственных предприятий

Как отмечено выше, основной целью оптимального управления повышением качества производимой ПП продукции, является получение дополнительной прибыли за счет улучшения потребительских свойств, формирующих полезность этой продукции с точки зрения потребителей, позволяющее увеличить ее рыночную стоимость. Целесообразность повышения качества путем модернизации производимой продукции оценивается путем сравнения полученных в результате этого ее потребительских свойств, со свойствами аналогичной продукции, производимой конкурентами [2]. При этом все полезные потребительские свойства продукции, полученные в результате ее модернизации, для проведения оценки их эффективности, целесообразно разбить на следующие три основные группы:

- новые перспективные потребительские свойства, которые планируется обеспечить за счет повышения качества продукции, при минимальных затратах на ее модернизацию;
- эффективные свойства, сохраняемые в производимой продукции после ее модернизации;
- существующие неперспективные свойства, которые требуется совершенствовать в процессе модернизации производимой продукции.

В общем случае новые перспективные потребительские свойства, которыми будет обладать продукция в результате повышенного ее качества, как правило, должны отсутствовать у аналогов производимых конкурентами. Напротив, существующие неперспективные свойства присущие различным аналогам производимой конкурентами продукции, должны совершенствоваться при повышении ее качества. Следует также иметь в виду, что приступая к модернизации производимой продукции для повышения ее качества, необходимо сбалансировать рыночную стоимость этой продукции на различных сегментах рынка с покупательской способностью основной массы потребителей. Иначе, в силу высокой стоимости, продукция повышенного качества может оказаться невостребованной потребителями.

Пусть предприятие планирует получить дополнительную прибыль ΔP_{ij} , производя одну и ту же продукцию i наименования на различных j сегментах рынка с соответствующим им уровнем качества q_j . Следовательно, возникает

необходимость в определении таких объемов производства $V_{ij}^*(q_j)$ продукции i наименования на каждом j сегменте рынка, которые позволяют ПП получить максимальную суммарную прибыль P^* , определяемую следующим образом:

$$P^* = \sum_{j=1}^m V_{ij}^*(q_j)(C_j^*(q_j) - C_j(q_j)) \rightarrow \max,$$

с учетом ограничений вида: $V_{j,i}^{**}(q_j) \leq V_{j,i}^{**}(q_j)$.
Здесь: m – общее количество охватываемых ПП сегментов рынка; $V_{ij}^{**}(q_j)$ – объемы спроса на i вид продукции на j сегменте рынка; $C_j^*(q_j)$ – оптовая или отпускная цена продукции i наименования для j сегмента рынка; $C_j(q_j)$ – себестоимость или затраты связанные с производством одной единицы продукции i наименования с уровнем качества, равным q_j .

Для решения данной задачи можно использовать метод линейного программирования [3].

Учитывая также принятый на ПП уровень рентабельности R целесообразно определить сбалансированное значение затрат $C_j(q_j)$ с требуемым уровнем качества q_j для каждого j сегмента рынка, используя следующее соотношение:

$$RC_j(q_j) \leq C_j^*(q_j).$$

Состав же затрат на повышение качества производимой продукции определяется в соответствии со специальными методиками планирования повышения уровня качества [4]. Состав затрат, которым следует руководствоваться при их планировании и учете может быть следующим:

- затраты на новую продукцию улучшенного качества, включающие затраты на подготовку и ее внедрение в производственный процесс в том числе и капитальные вложения в развитие основных производственных фондов;
- затраты на модернизацию производимой продукции, направленные на повышение ее технического уровня, улучшение социально-экономических показателей, повышение уровня стандартизации и унификации, снижение материалоемкости, улучшение технологичности с целью обеспечения конкурентоспособности или соответствия качества продукции уровню лучших мировых образцов. Сюда же относятся затраты на модернизацию производственного процесса с целью повышения производительности труда рабочих;
- затраты на снятие с производства устаревшей продукции;
- затраты на обеспечение стабильности показателей качества продукции и снижение брака.

2. Оптимальное управление переменными издержками производства в краткосрочном периоде как фактор повышения эффективности производственных предприятий

Пусть ПП, выпускающее различные виды продукции, планирует в краткосрочном периоде

получить максимально возможную прибыль. Для этого ему целесообразно, в первую очередь, минимизировать суммарные издержки (см. рис.) [5], связанные с производством различных видов продукции.

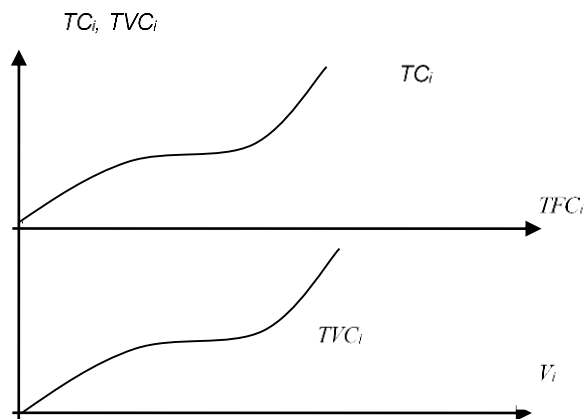


Рис. Зависимость суммарных издержек от объемов производства V . (Здесь: TC_i – общие суммарные издержки, TFC_i – суммарные постоянные издержки и TVC_i – средние переменные издержки производства i вида продукции)

Из приведенного рисунка видно, что для получения максимального прироста прибыли ПП следует провести оптимизацию средних переменных издержек производства TVC_i для каждого вида производимой продукции, которые определяются следующим образом:

$TVC_i = TC_i / V_i$, где V_i – запланированные объемы производства продукции i вида. В этом случае ПП для каждого вида производимой продукции необходимо решить задачу условной оптимизации, которая позволяет определить относительное минимальное значение издержек производства TVC_i^* , т.е. значение средних

переменных издержек производства на границе S^* области S , ограниченной объемами имеющихся у ПП производственных факторов и их допустимой стоимостью, определяемой с учетом запланированного роста качества производимой продукции. При этом будут также учитываться и затраты, связанные с оплатой труда производственных рабочих требуемой квалификации, определяющих один из факторов вводимых в производственный процесс.

В общем случае задача условной минимизации издержек производства TVC_i в краткосрочном периоде, связанных с изготовлением продукции i вида требуемого качества, можно сформулировать следующим образом. Необходимо определить такие объемы и соответствующую им минимально – допустимую стоимость вводимых в производство факторов с учетом требуемой квалификации производственных рабочих и заданном объеме V_i производства продукции i вида, при которых обеспечивается требуемый уровень качества

готовой продукции, а средние переменные издержки производства TVC_i в краткосрочном периоде принимают минимальное значение.

Для решения данной задачи сформулируем ее общую постановку следующим образом. Пусть заданы объемы производства V_i продукции i вида и соответствующая производственная функция $V_i(X)$, построенная эмпирическим путем [6]:

$$V_i - b_1 x_1(i) + \dots + b_j x_j(i) + \dots + b_n x_n(i) \quad (1)$$

где b_j – коэффициенты пропорциональности, определяемые методом регрессионного анализа;

$x_j(i), j = 1, 2, \dots, n$ – объемы вводимых в производство факторов j вида.

Требуется определить такие сбалансированные объемы всех вводимых в производство факторов $x_j(i), j = 1, 2, \dots, n$, при которых суммарные переменные издержки TVC_i^* :

$$TVC_i^* = \sum_{j=1}^n C_j(i) x_j(i) \rightarrow \min,$$

при ограничениях типа равенства (1) и граничных условий вида: $x_j(i) \leq x_{j \max}(i)$,

$C_j(i) \geq C_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$. Здесь: $x_{j \max}(i)$ – объемы j фактора производства, которыми обладает ПП; $C_j(i)$ – фактическая стоимость одной условной единицы j фактора производства требуемого качества, используемого при изготовлении одной единицы продукции i вида; $C_j^*(i)$ – требуемая минимально допустимая стоимость одной условной

единицы j фактора производства, позволяющая обеспечить требуемое качество в процессе производства одной единицы продукции i наименования.

Следует отметить, что, если бы функциональная зависимость издержек производства TVC_i^* имела бы ярко выраженный минимум, расположенный внутри области допустимых значений факторов производства, определяемых граничными условиями $x_j(i) \leq x_{j\max}(i), C_j(i) \geq C_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$, то поставленная задача решалась бы тривиально методом неопределенных коэффициентов Лагранжа [3] путем минимизации функции следующего вида:

$$TVC_i^* = \sum_{i=1}^n C(i)x_j(i) + \beta[V_i - b_1x_1(i) + \dots + b_jx_j(i) + \dots + b_nx_n(i)],$$

где β – неопределенный коэффициент Лагранжа.

Реализация же данной задачи при условной оптимизации затруднена тем, что ее решение $X^* = \{x_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$ будет лежать на границе S^* области S допустимых значений различных факторов производства (параметров оптимизации) $X(i)$ и их стоимости $C(i)$.

Рассмотрим один из подходов решения сформулированной выше задачи условной оптимизации методом подборки значений факторов производства $X^* = \{x_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$. В этом случае будем исходить из того, что ПП, стремящемуся получить максимально возможную прибыль, необходимо так организовать ввод факторов производства, чтобы издержки производства TVC_i одной единицы продукции i вида были бы минимальными. Следовательно, оптимальное управление производственным процессом, в первую очередь, должно ориентироваться на минимизацию издержек производства TVC_i без снижения запланированного качества производимой продукции i вида. Основная цель такого управления достигается в том случае, когда для всех объемов факторов $x_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$ при заданном объеме производства $V_i(X)$ продукции i вида и производственной функции:

$$V_i(X) = b_1x_1^*(i) + \dots + b_jx_j^*(i) + \dots + b_nx_n^*(i),$$

выполняется следующее условие сбалансированности объемов $x_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$ вводимых в производственный процесс факторов [7]:

$$\begin{aligned} \frac{MP_1(i)}{C_1(i)} x_1^*(i) &= \frac{MP_2(i)}{C_2(i)} x_2^*(i) = \dots = \\ &= \frac{MP_i(i)}{C_i(i)} x_j^*(i) = \dots = \frac{MP_n(i)}{C_n(i)} x_n^*(i). \end{aligned}$$

при граничных условиях: $x_j(i) \leq x_{j\max}(i), C_j(i) \geq C_j^*(i), j = 1, 2, \dots, n$, где $MP_j(i)$ – предельный продукт j фактора производства; $C_j(i)$ – рыночная цена одной единицы j фактора производства.

Другими словами, при заданном объеме производства $V_i(X)$ ПП может обеспечить равновесие вводимых в производство факторов и минимизировать на этой основе свои издержки в краткосрочном периоде в том случае, когда любая замена одного фактора другим уже не приводит к снижению издержек, связанных с производством одной единицы продукции i вида, обладающей требуемым качеством.

Таким образом, для повышения эффективности работы ПП, требуется решить двухкритериальную задачу оптимального управления вводимыми в производство факторами, используя следующую ее свертку к однокритериальной задаче:

$$W = (\beta_1 P^* - \beta_2 \sum_{i=1}^{m_1} TVC_i^*) \rightarrow \max,$$

где β_1, β_2 – коэффициенты значимости первого и второго критерия оптимальности, определяемые экспертным путем; m_1 – количество видов продукции производимых ПП.

Таким образом, повышение эффективности работы ПП в этом случае получается за счет максимально возможного роста суммарной прибыли и минимизации средних издержек производства в краткосрочном периоде.

Заключение

1. Решение первой сформулированной в статье задачи управления позволяет определить оптимальные объемы производства продукции с различным уровнем ее качества, позволяющим обеспечить промышленному предприятию получение максимально возможной прибыли диверсифицируя свою производственную деятельность на различных по покупательской способности сегментах современного рынка с учетом спроса потребителей.

2. Разработанный принцип минимизации средних переменных издержек путем сбалансированного ввода в производственный процесс факторов производства, позволяет снизить себестоимость различных видов производимой предприятием продукции и на этой основе обеспечить дополнительный прирост получаемой прибыли, а, следовательно, и рост эффективности работы ПП.

3. Предложенные методические положения оптимального управления производственной деятельностью без принципиальных изменений можно распространить на различные виды производимой ПП продукции с целью оптимального управления получаемой предприятием дополнительной прибыли и роста на этой основе эффективности его функционирования.

Литература

1. Дубаневич Л.Э. Управление прибылью организации: проблемы и пути их преодоления // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. 2020. № 1(26). С. 17 – 21.
2. Отварухина Н.С., Веснин В.Р. Управление конкурентоспособностью. М.: Юрайт, 2019. 336 с.
3. Зайцев М.Г., Варюхин С.Е. Методы оптимизации управления и принятия решений: примеры, задачи, кейсы. М.: Дело АНХ, 2015. 640 с.
4. Яшин С.Н., Оhezина Г.М. Методики оценки качества планирования реализации проектных процессов инноваций на производственных предприятиях // Финансы и статистика. 2015. № 34 (658). С. 58 – 66.
5. Хорн Дж., Ван К. Основы управления финансами. М.: Финансы и статистика, 2002. 800 с.
6. Селищев А.С. Микроэкономика. СПб.: Питер, 2002. 448 с.
7. Мелехин В.Б., Мелехин П.В. Методика управления сбалансированным ростом объемов строительного производства // Экономика строительства. 2009. № 3. С. 18 – 22.

References

1. Dubanevich L.E. Upravlenie pribyl'yu organizacii: problemy i puti ih preodoleniya [Profit management of the organization: problems and ways to overcome them]. Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya ekonomika: rossijskij i zarubezhnyj opyt [Actual problems and prospects of economic development: Russian and foreign experience]. 2020, 1 (26), 17 – 21.
2. Otvoruhina N.S., Vesnin V.R. Upravlenie konkurentosposobnost'yu [Competitiveness management]. Moscow: Yurajt, 2019, 336 p.
3. Zajcev M.G., Varyuhin S.E. Metody optimizacii upravleniya i prinyatiya reshenij: primery, zadachi, kejsy [Methods for optimizing management and decision-making: examples, tasks, cases]. Moscow: Delo ANH, 2015, 640 p.
4. Yashin S.N., Ohezina G.M. Metodiki ocenki kachestva planirovaniya realizacii proektnyh processov innovacij na proizvodstvennyh predpriyatiyah [Methods for assessing the quality of planning the implementation of project innovation processes at industrial enterprises]. Finansy i statistika [Finance and statistics]. 2015, 34 (658), 58 – 66.
5. Horn Dzh., Van K. Osnovy upravleniya finansami [Fundamentals of financial management]. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 800 p.
6. Selishchev A.S. Mikroekonomika [Microeconomics]. Saint Petersburg: Piter, 2002. 448 p.
7. Melekhin V.B., Melekhin P.V. Metodika upravleniya sbalansirovannym rostom ob'emov stroitel'nogo proizvodstva [Methods of managing balanced growth of construction production volumes]. Ekonomika stroitel'stva [Economy of construction]. 2009, 3, 18 – 22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тимур Гаджиевич Айгунов, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70. Email: 915533@mail.ru

Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70. Email: pashka1602@rambler.ru

Timur G. Aygumov, Ph.D. (Econ), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, Russian Federation, 367015, Republic of Dagestan, Makhachkala, Imam Shamil, Ave,70. Email: 915533@mail.ru

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, Russian Federation, 367015, Republic of Dagestan, Makhachkala, Imam Shamil, Ave,70. Email: pashka1602@rambler.ru

Поступила в редакцию: 11.08.2021
Принята к публикации: 17.11.2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 681.5; 517.935

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.055>

Моделирование редких событий качки беспилотного катамарана

И.Ю. Липко¹, e-mail: ivanlipko@yandex.ru¹Севастопольский государственный университет

Аннотация Статья посвящена вопросу моделирования редких событий, которые возникают при качке катамарана. Система управления автономного катамарана должна уметь распознавать нежелательные ситуации, которые могут привести к осуществлению редких событий. В данной статье приводятся несколько методов, позволяющих проводить моделирование редких событий и делать оценку риска возникновения редкого события. Методы основываются на теории больших уклонений. Первый метод позволяет оценить возможные «ожидаемые потери» при достижении редкого события путём оценки скорости убывания вероятности компонентов вектора состояния в редком состоянии. Оценка осуществляется путём расчёта квазипотенциалов из аттрактора до порогового значения состояния. Второй метод позволяет оценить вероятность движения вдоль наиболее вероятной траектории к редкому событию. Оценка осуществляется путём сравнения вектора состояния с состояниями на наиболее вероятной траектории к редкому событию. Точность оценок зависит от вектора состояния. Приводится сравнение с результатами, полученными с помощью метода Монте-Карло. Указанные методы могут быть использованы для создания систем супервизорного управления и систем поддержки принятия решений при оценке рискованности совершения морских переходов.

Ключевые слова: редкие события, квазипотенциал, теория больших уклонений, катамаран, оценка вероятности, инстантон, А-профиль.

Rare roll event modeling of unmanned catamaran

Ivan U. Lipko¹, e-mail: ivanlipko@yandex.ru¹Sevastopol State University, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the issue of modeling rare events that occur when a catamaran is pitching. The control system of an autonomous catamaran should be able to recognize undesirable situations that can lead to the rare events. This article provides several methods for modeling rare events and making estimation of risk of a rare event occurrence. The methods are based on the large deviations theory for dynamical systems. The first method allows to estimate possible losses via calculation of the probability decreasing rate of the state vector components in a rare state. The estimation is carried out by calculating the quasipotential from the state close to the attractor to the threshold state. The second method allows to estimate the probability of moving along the most likely trajectory to a rare event. The evaluation is carried out by comparing the studied state vector with the states on the most likely trajectory. The accuracy of the estimates depends on the studied state vector. A comparison with the results obtained using the Monte Carlo method. These methods can be used to create supervisory control systems and decision support systems when assessing the riskiness of sea navigation.

Key words: rare events, quasipotential, large deviations theory, catamaran, probability estimation, instanton, A-profile.

Введение

Судно на морском переходе находится под влиянием ветро-волновых воздействий, которые создают качку судна, что может приводить к нежелательным последствиям: порча и потеря груза, поломки оборудования, разрушение судна, гибель экипажа, невыполнение миссии. Обычно такие события являются редкими. Современные системы управления уменьшают амплитуды качки, но не исключают возникновения больших амплитуд. Следовательно, чтобы избежать таких ситуаций, необходимо понимать, что является их причиной и как происходит движение по отношению к редким событиям, и в дальнейшем строить алгоритмы распознавания указанного движения.

Система управления автономного катамарана или любого другого судна должна уметь распознавать нежелательные ситуации, которые могут привести к осуществлению редких событий. В настоящее время существует большое количество судов с готовыми системами управления и исполнительными механизмами, отказаться от

которых нельзя. И следовательно, необходимо создавать системы «второго уровня», супервизорного управления над уже имеющимися системами управления.

Редкое событие обычно задают в качестве некоторой величины порога, достижение которого нежелательно, например большой крен или дифферент. Эту величину крена будем называть критическим состоянием (КС), критической точкой или порогом. Траектория, вдоль которой может достигаться величина крена сама по себе является редким событием и тоже представляет интерес.

Для изучения редких событий различают три группы методов, которые позволяют подойти к вопросу с нескольких сторон: аналитические методы, численные методы, методы моделирования. Среди этих методов наиболее часто применяемым является метод Монте-Карло (ММК) ввиду его относительной простоты, интуитивности и возможности исследовать более полные модели систем. Однако он и его модификации упираются в быстроедействие современных вычислительных машин [1].

В настоящей статье на примере катамарана приводятся способы моделирования редких событий: способ получения наиболее вероятной траектории движения к критическим значениям качки, способ оценки скорости убывания вероятности и оценки вероятности движения вдоль наиболее вероятных траекторий из разных точек фазового пространства. Все результаты основываются на методах, известных из теории больших уклонений применительно к динамическим системам.

1. Математические модели

В разделе приводится описание математической модели беспилотного катамарана и внешних возмущений, действующих на катамаран.

1.1. Катамаран

Катамаран – это судно, которое имеет два симметричных корпуса, соединённых между собой палубой. Исследуемая модель катамарана обладает следующими размерами: длина 90 м, ширина 25.96 м, осадка 2.6 м, водоизмещение 734.54 тонн. Катамаран обладает интеллектуальной системой беспилотного движения и слежения за мореходными показателями, обеспечивающей безопасность движения и сохранности перевозимого оборудования и груза.

Для уменьшения килевой и вертикальной качек исследуемый катамаран оборудован двумя водонагнетающими клапанами и подводным крылом. За счёт этих исполнительных механизмов создаются силы и моменты, действующие против внешних возмущений. Управление клапанами и углом атаки крыла осуществляется регулятором, который получает информацию с датчиков крена и ускорений, и рассчитывает необходимые сигналы управления (рис. 1).

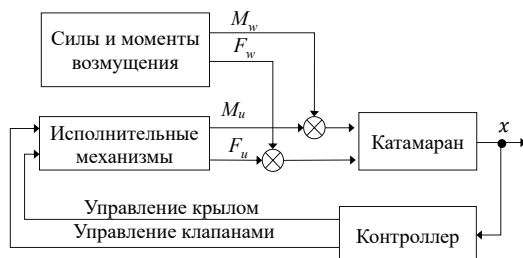


Рис. 1. Схема управления качкой катамарана

В соответствии с теорией корабля существует взаимосвязь между всеми видами качки судна: бортовой, килевой, вертикальной и др. [2 - 5]. Уравнения движения твердого тела для судна имеют вид:

$$M\dot{v} + C(v)v = \tau \quad (1)$$

где M – матрица инерции, которая содержит коэффициенты масс судна, C – матрица, которая содержит гидродинамические и восстанавливающие коэффициенты; v – вектор линейных и угловых скоростей; τ – обобщённый вектор внешних сил и моментов.

В рассматриваемой задаче мы ограничиваемся линейным представлением, учитывая, что в качестве воздействующих сил и моментов выступают силы и моменты ветро-волнового возмущения F_w и M_w , силы и моменты, создаваемые успокоителями качки

катамарана: водонагнетающих клапанов F_{flap} и M_{flap} , силы и моменты от подводного крыла F_{Tfoil} и M_{Tfoil} :

$$\begin{bmatrix} F_w + F_u \\ M_w + M_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_w \\ M_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{Tfoil} + F_{flap} \\ M_{Tfoil} + M_{flap} \end{bmatrix}$$

Линейная модель пространства состояния катамарана с системой управления имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot (u + w) \\ y = C \cdot x \end{cases}$$

где $x = [\eta, \dot{\zeta}, \eta, \zeta, \dot{\theta}, \theta]$ – вектор состояния, включающий скорость вертикальной качки, скорость дифферента, вертикальная качка, угол дифферента, скорость крена, крен, $u = \begin{bmatrix} F_u \\ M_u \end{bmatrix}$ – управляющий сигнал, $w = \begin{bmatrix} F_w \\ M_w \end{bmatrix}$ – внешние возмущения, блочные матрицы

$$A = \begin{bmatrix} -A_1^{-1}B_1 & -A_1^{-1}C_1 \\ I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, [A_1] = \begin{bmatrix} M + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & I_5 + A_{55} \end{bmatrix},$$

$$[B_1] = \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix}, [C_1] = \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix},$$

с численными значениями

$$A = \begin{bmatrix} -0.90 & -25.10 & -14.15 & -17.49 & 10^{-3} & 0 \\ 0.05 & -0.50 & 0.24 & -12.40 & 10^{-3} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10^{-3} & 10^{-3} & -10^{-2} & -10^{-2} & -5.01 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0082 & 0.0000083 \\ -0.00016 & 0.000017 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.002 & 0.0000082 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

и единичной матрицей C того же размера что и матрица A ; $A_{33}, A_{55}, A_{35}, A_{53}$ – присоединённые массы, $B_{33}, B_{55}, B_{35}, B_{53}$ – гидродинамические демпфирующие коэффициенты, $C_{33}, C_{55}, C_{35}, C_{53}$ – коэффициенты восстанавливающих сил. Численные значения матриц получаются из уравнения движения твердого тела (1).

Для уменьшения амплитуды качки катамарана используется линейно-квадратический регулятор с критерием:

$$J(u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt,$$

где Q – постоянная положительно-определённая симметричная матрица весов состояния; R – постоянная положительно-определённая (или полуопределённая) симметричная матрица весов управления. В результате синтеза регулятора имеем систему с обратной связью

$$\begin{cases} \dot{x} = (A - BK) \cdot x + B \cdot w \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad (2)$$

где закон управления $u = -Kx$,

$$K = \begin{bmatrix} -0,1773 & -0,2934 & 0,2001 & 1,8349 \\ 0,0001 & 0,0081 & -0,0002 & 0,0014 \end{bmatrix} \cdot 10^4.$$

1.2. Внешние возмущения

Для моделирования внешних сил и моментов используется цепочка блоков формирующих фильтров (рис. 2), на вход которых подаётся белый шум, а на выходе получают силы и моменты. На входе первого блока подаётся белый шум, а на выходе получаем амплитуды волны. В качестве параметров для блока формирования амплитуды волны используются скорость ветра, курсовой угол

на генеральное направление ветра. На выходе второго блока получаем силы и моменты возмущений, которые подаются на модель катамарана как w .

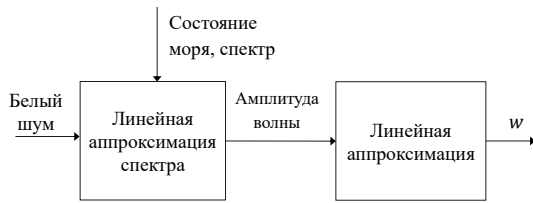


Рис. 2. Схема формирования сил и моментов внешнего возмущения

Спектр Пирсона-Московица

$$S(\omega) = 8.1 \cdot 10^{-3} g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-0.74 \cdot \left(\frac{g}{V}\right) \cdot \omega^{-4}\right),$$

где g – ускорение свободного падения, V – скорость ветра; представляется в виде передаточной функции второго порядка

$$H_{PM}(s) = \frac{K_{\omega} s}{s^2 + 2\lambda\omega_0 s + \omega_0^2},$$

где $K_{\omega} = 2\lambda\omega_0\sigma$ – коэффициент усиления, $\sigma^2 = \max_{0 < \omega < \infty} S(\omega)$ – константа интенсивности волнения, σ – демпфирующий коэффициент, ω_0 – доминирующая частота волнения. Для целей статьи линейного представления достаточно.

2. Теория больших уклонений

Раздел содержит основные теоретические выкладки из теории больших уклонений, на которых основывается дальнейшее решение задач. Сначала рассмотрим общую задачу отыскания наиболее вероятной траектории движения. Затем перейдём к линейной системе, по которой будет видно, как получить результаты для катамарана (2).

2.1. Наиболее вероятная траектория движения к критическим точкам

Пусть рассматривается динамическая система, возмущаемая белым шумом

$$\dot{x} = f(x, t) + \sqrt{\varepsilon} \sigma(x, t) \xi(t), \quad x(0) = 0. \quad (3)$$

где $x = x(t)$ – вектор состояния, $f(x, t)$ – вектор-функция, описывающая динамику системы; $\sigma(x, t)$ – коэффициент диффузии, $\xi(t)$ – белый шум, $\sqrt{\varepsilon}$ – амплитуда шума.

Вентцель и Фрейдлин [6] показали, что вероятность наблюдения любой выборочной траектории близкой к заданной траектории $q = q(t)$ оценивается как $P \left\{ \sup_{t \in [0, T]} \|q - x\| < \delta \right\} \asymp \exp(-\varepsilon^{-1} S_T(q))$, для достаточно малых $\delta > 0$, где знак \asymp обозначает логарифмическую эквивалентность, т.е. $h(x, \varepsilon) \asymp g(x, \varepsilon)$ значит, что $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln h(x, \varepsilon)}{\ln g(x, \varepsilon)} = 1$.

Функционал $S_T(x) = \frac{1}{2} \int_0^T (\dot{x} - f(x, t))^T \sigma \sigma^T (\dot{x} - f(x, t)) dt$ называется функционалом действия (или функцией роста).

Вероятность $P(x(T) \in A)$ того, что стохастический процесс (3) закончится в нефиксированный момент времени T в множестве $A \subset \mathbb{R}^n$, состоит из вкладов всех траекторий, близких ко всем возможным траекториям, заканчивающимся в A . Вклад, каждой из этих траекторий экспоненциально убывает. Наибольший вклад в эту вероятность делает

траектория с наименьшим значением функционала действия, другими словами, наиболее вероятная траектория из φ_0 в A (другое название этой траектории – инстантон [6]):

$$x^* = \arg \min_{x(t) \in \Theta} S_T(x), \quad (4)$$

где $\Theta = \{\varphi(t) \in C([0, T_S], \mathbb{R}^n) : \varphi(0) = \varphi_0, \varphi(T) \in A\}$, T_S – время симулирования.

Здесь и далее будет говориться о вероятности в смысле не одной реализации, а о семействе реализаций, удовлетворяющих множеству Θ для достаточно малых $\delta > 0$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} P \left\{ \sup_{t \in [0, T]} \|x - x^*\| < \delta \mid x(T) \in A \right\} = 1.$$

Такую вероятность можно записать как $P\{x(t) \in A\} = \exp\{-\varepsilon^{-1} S_T(x)\}$. Параметр ε можно использовать как параметр нашей «рискованности» оценки.

Для случая линейной стационарной системы

$$\dot{\varphi}_t = A\varphi_t + p(t), \quad \varphi(0) = \varphi_0, \quad \varphi(T) = \varphi_f, \quad (5)$$

и уточнения задачи (4)

$$\varphi^* = \arg \min_{\varphi: \varphi(-\infty) = \varphi_0, \varphi(0) = \varphi_f} S_T(\varphi) \quad (6)$$

решение можно получить аналитически [7]:

$$\varphi^* = D e^{A^T(T-t)} D^{-1} \varphi_f, \quad (7)$$

$$p^* = \sigma^T e^{-A^T t} \psi_f, \quad (7a)$$

где $\varphi_t = \varphi(t)$ – n -вектор состояния, $A = \left. \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right|_{x_{lin}}$ –

матрица частных производных в точке линеаризации x_{lin} , φ_0 – аттрактор, $p^*(t)$ – «оптимальное» внешнее возмущение, ψ_f – значение сопряжённой системы, D – соответствует уравнению Ляпунова $\sigma \sigma^T = A^T D + D A$. Очевидно, что строить инстантон для бесконечного времени бессмысленно, поэтому при его построении ограничиваемся некоторым отрезком времени.

Подставляя элементы уравнения (2) в (5), будет решаться задача определения наиболее вероятной траектории для катамарана.

Формулы (4) и (6) можно записать через квазипотенциалы как

$$\varphi^* = \arg V_{\Theta} = \arg \min_{x(t) \in \Theta} S_T(x),$$

$$\varphi^* = \arg V(\varphi_0, \varphi_f) = \arg \min_{\varphi: \varphi(-\infty) = \varphi_0, \varphi(0) = \varphi_f} S_T(\varphi)$$

где V_{Θ} – квазипотенциал по множеству Θ и $V(\varphi_0, \varphi_f) = V(\varphi_0, -\infty | \varphi_f, 0) = \min_{\varphi: \varphi(-\infty) = \varphi_0, \varphi(0) = \varphi_f} S(\varphi) = S(\varphi^*)$ –

квазипотенциал системы из φ_0 в φ_f , вычисляемый по принципу сжатия: требуется рассматривать только те траектории, которые начинаются в точке φ_0 и заканчиваются в φ_f ; $S(\varphi) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^0 (\dot{x} - f(x, t))^T \sigma \sigma^T (\dot{x} - f(x, t)) dt$. Далее по значениям квазипотенциалов будут выполняться оценки вероятностей и другие вычисления.

2.2. Профиль движения к критической точке

Используя формулы (7), (7a) можно получить аналитические выражения для вычисления значений квазипотенциала и вероятности в каждой точке инстантона

$$\hat{S}(t; \varphi^*) = \psi^T(T) \cdot (D e^{A^T(T-t)} - e^{A^T(T-t)} D) \cdot \psi(T), \quad (8)$$

$$\hat{P}\{t; \varepsilon, \varphi^*\} = \exp\{-\varepsilon^{-1} \hat{S}(t; \varphi^*)\}. \quad (8a)$$

Таким образом, получаем информацию не только о том, вдоль какой траектории происходит наиболее вероятное движение к критической точке, но и оценки

вероятностей в каждой точке этой траектории. Это в свою очередь позволяет создавать алгоритмы онлайн прогноза и офлайн исследования динамической системы.

В обоих случаях оценки делаются путём сопоставления текущего интересующего состояния φ_c с инстантоном φ^* (рис. 3). Состоянию φ_c лучше всего будет соответствовать такое состояние на профиле, которое «ближе» всего, т.е. для которого выполняется

$$H_{\varphi^*}^* = H_{\varphi_c}^*(\varphi_c) = \min_{t \in [0, T]} H_{\varphi^*}(\varphi_c, t),$$

где $H_{\varphi^*}(\varphi_c, t) = \|\varphi_c - \varphi^*(t)\|_{\mu}$, $\|a\|_{\mu} = \sqrt{\sum_i \mu_i a_i^2}$ – норма с весовыми коэффициентами $\mu_i \in [0, 1]$.

Кортеж $z(\varphi_c) = \{H_{\varphi^*}^*(\varphi_c), \hat{S}(t; \varphi^*), \hat{P}\{t; \varepsilon, \varphi^*\}\}$ характеристик, связанных с точкой φ_c на профиле, называем *A-профилем*, поскольку инстантон начинается в аттракторе. A-профиль имеет доверительный интервал $H_{\varphi^*}^*$. Описанную процедуру называем *проецированием на A-профиль*.

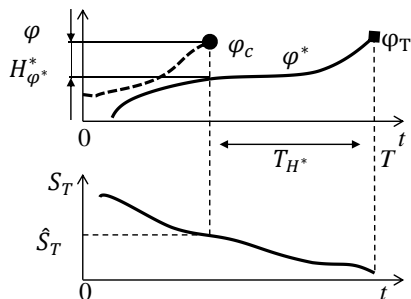


Рис. 3. Профиль движения к критической точке φ_T и сравнение с текущим состоянием φ_c

2.2. Пример

В линейном спектре Пирсона-Московица не встречаются резкие порывы ветра, но при симулировании с помощью ММК возможны реализации, когда катамаран достигает больших углов крена. Управление с обратной связью по состоянию предназначено для уменьшения влияния внешних возмущений, но не гарантирует от превышения пороговых уровней, которые могут разрушить объект или привести к нежелательным последствиям. Рассмотрим несколько примеров.

Зададим пороговое значение крена 5° при ветре 10 м/с направленным в борт катамарана. Выбор этого порога обусловлен тем, что для данной системы управления и скорости ветра такой крен является редким событием: для получения 1000 реализаций выхода к порогу с помощью ММК было смоделировано 1085000 траекторий длительностью симуляции в $T_s = 300 \text{ с}$ (шаг дискретности 0.01 с), на что было затрачено более 1.5 часа (24 потока).

На рис. 4 показаны участки траекторий (до момента пересечения порога КС), полученные путём симулирования системы (2) с помощью ММК, в сравнении с инстантоном. Обращу внимание на то, что траектории, полученные симулированием, с левой стороны не начинаются в аттракторе и это нормально. А на правом конце траектории очень близки к инстантону. Здесь же показано семейство оценок вероятностей (8а) при движении вдоль инстантона при различных значениях ε .

На рис. 5 показана плотность этих же траекторий на фазовой плоскости в сравнении с инстантоном.

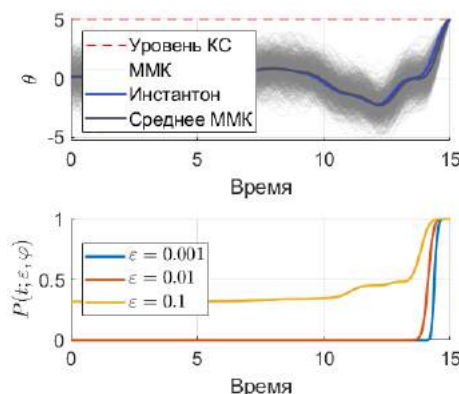


Рис. 4. Траектории, вдоль которых достигается КС крена $\theta = 5$ при ветре 10 м/с в борт.

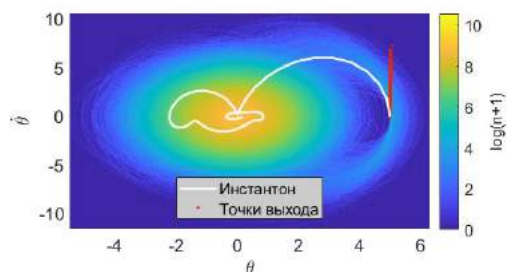
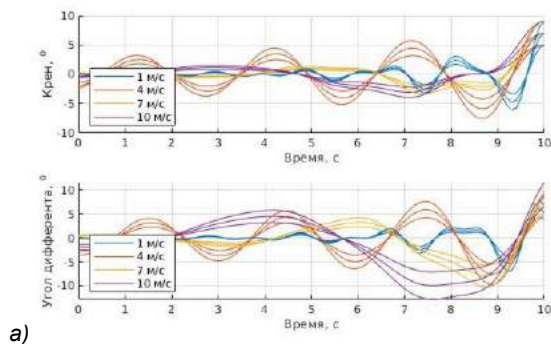


Рис. 5. Плотность траекторий на фазовой плоскости. Сравнение метода Монте-Карло с инстантоном ($\theta = 5^\circ$ при ветре 10 м/с в борт).

Можно получить наиболее вероятные траектории для разных ветров, воздействующих на катамаран. Например, для крена и дифферента в 5, 7, 9 градусов (рис. 6). Эти результаты можно интерпретировать следующим образом. Для достижения критических углов качки при низких скоростях ветра судно необходимо раскачивать с достаточно высокой частотой. Чем сильнее ветер, тем плавнее становится раскачка: происходит накопление энергии. При ветре более 10 м/с внешние силы тратят меньше энергии на раскачку, частота меньше, чем в предыдущем случае. Необходимости в сильном рывке нет. При этом дифферент значительно больше. Для одной и той же скорости ветра инстантоны для разных порогов похожи (на рис. 6 ветра одной скорости указаны одним цветом). Эти закономерности сохраняются для всех курсовых углов катамарана.



а)

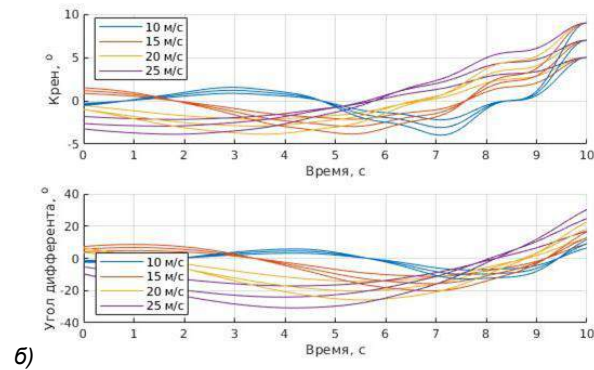


Рис. 6. Инстантоны разных углов качки при воздействии ветров а) менее 10 м/с, б) более 10 м/с

3. Оценка скорости убывания вероятности

3.1. Постановка задачи и решение

Описанный ниже метод позволяет оценить скорость убывания вероятности отклонения элементов вектора состояния от КС путём построения семейства А-профилей $\bar{\varphi}_{n\varphi}$ (n_{φ} – количество элементов в семействе) к нескольким КС и получении значений оценок квазипотенциалов из аттрактора в интересующее КС x_f по А-профилям семейства $\bar{\varphi}_{n\varphi}$.

Квазипотенциал для некоторого инстантона несёт информацию о том, какую эквивалентную энергию необходимо сообщить системе для того, чтобы она двигалась вдоль этого инстантона. Идея алгоритма базируется на том факте, что если «разрезать» инстантон на части, то сумма квазипотенциалов этих частей будет равна квазипотенциалу всего инстантона.

Для описания алгоритма рассмотрим пример на плоскости. Пусть объект задан вектором состояния $\varphi(t)$ и движется из аттрактора $\varphi(0) = \varphi_0$ вдоль траектории $\hat{\varphi}$ (рис. 7). Пусть обозначена КС, заданная уровнем φ_{1f} и построен А-профиль φ_{1t}^* к φ_{1f} . Пересечение уровня φ_{1f} происходит в точке φ_f , для которой состояние объекта $\varphi_2 \in \varphi(t)$ далеко от того, которое найдено в А-профиле φ_{1t}^* . Другими словами, объект, двигаясь под воздействием внешних возмущений, может приближаться к критическому состоянию φ_{1f} не только вдоль А-профиля φ_{1t}^* , но и далеко от него, двигаясь вдоль другого А-профиля φ_{2t}^* (построенного к КС φ_{2f}).

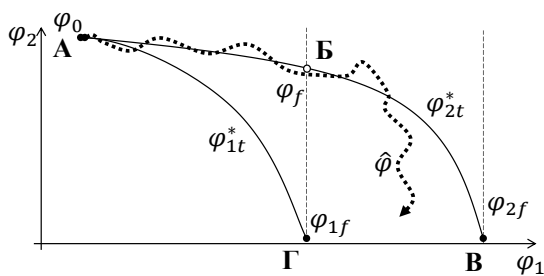


Рис. 7. К расчёту квазипотенциала из аттрактора в критическое состояние. Штрихом обозначена возможная реализация движения

Поскольку нас интересуют вероятности движения из аттрактора до КС, то сначала найдём оценку квазипотенциала траектории, начинающейся в аттракторе φ_0 и заканчивающейся в точке φ_f по (8), а затем рассмотрим получение оценки убывания вероятностей для состояния φ_{1T} . Траектория объекта не проходит вдоль кривой АГ, поэтому рассматривать квазипотенциал вдоль этого участка не имеет смысла. С другой стороны, в целом для объекта, движение вдоль АГ будет более вероятным, потому что соответствующий квазипотенциал меньше, чем вдоль АВ.

Оценке квазипотенциала $V(\varphi_0, t_0 = -\infty | \varphi_{2T}, 0)$ соответствует кривая АВ. Оценке квазипотенциала $V(\varphi_f, t_f | \varphi_{2T}, 0)$ из точки пересечения критического состояния φ_f до φ_{2T} соответствует участок кривой БВ. И наконец, искомому квазипотенциалу $V(\varphi_0, t_0 | \varphi_f, t_f)$ соответствует участок кривой АБ. Здесь t_f обозначает время, которое затрачено при переходе от точки φ_f до φ_{2T} вдоль А-профиля.

Вычисление оценки ФД в точке пересечения порога φ_f проводим следующим образом. Вычисляем оценку квазипотенциала $V(\varphi_0, t_0 = -\infty | \varphi_{2T}, 0)$. Находим оценку квазипотенциала $V(\varphi_f, t_f | \varphi_{2T}, 0)$ в момент пересечения критического состояния φ_f . Тогда разность этих оценок будет искомой оценкой квазипотенциала $V(\varphi_0, \varphi_f) = V(\varphi_0, t_0 = -\infty | \varphi_f, t_f) = V(\varphi_0, t_0 = -\infty | \varphi_{2T}, 0) - V(\varphi_f, t_f | \varphi_{2T}, 0)$.

Если проделать эти вычисления для А-профилей из семейства $\bar{\varphi}_{n\varphi}$, то получим множество оценок $V_{\bar{\varphi}_{n\varphi}}(x_0, t_0 = -\infty | x_f, t_f)$ на интересующем уровне КС φ_f . По этому множеству можно судить о характере убывания вероятности движения вдоль А-профилей до достижения КС φ_f . Дополнительно по полученным оценкам квазипотенциалов можно построить ε -оценки вероятностей событий, связанных с распределением вектора состояния на пороге.

Приведённые выше вычисления естественно проводить не для бесконечных интервалов времени, а для ограниченных интервалов времени, допуская, что квазипотенциал, рассматриваемый в какое-то выбранное время, и квазипотенциал в бесконечности отличаются незначительно.

3.2. Пример

Построим 50 А-профилей для нескольких КС на интервале крена $\theta = [4; 9]$. Исследуем КС для крена $\theta = 5$ и определим точки на А-профилях пересекающиеся с ними (рис. 8). Для каждой точки известно значение квазипотенциала на соответствующем А-профиле.

Результат вычисления квазипотенциалов из каждого А-профиля для крена $\theta = 5$ в сравнении с гистограммой, полученной с помощью ММК, показан на рис. 9. Левая ось ординат относится к гистограмме и показывает количество точек-выходов траекторий, а правая относится к значению квазипотенциала. Видно, что гистограмма удовлетворяет значениям квазипотенциалов: чем больше значение квазипотенциала, тем реже будет происходить событие.

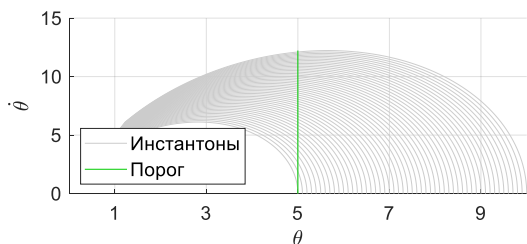


Рис. 8. Семейство инстантонов и порог $\theta = 5$

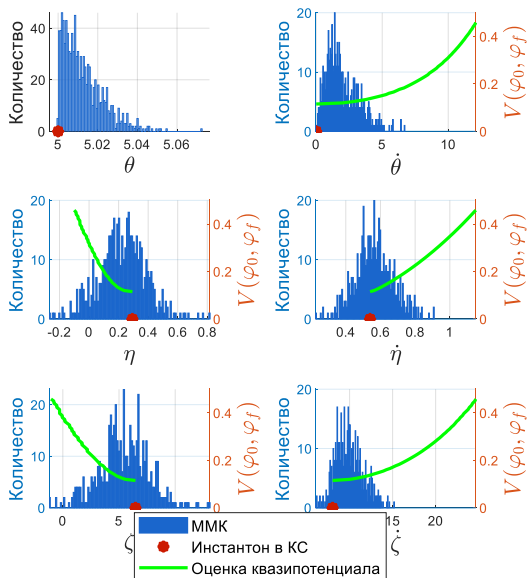


Рис. 9. Сравнение значений квазипотенциала с гистограммой состояний катамарана при пересечении порога $\theta = 5$ (правая ось – величина квазипотенциала)

4. Оценка вероятностей движения вдоль инстантонов к КС из разных состояний фазовой плоскости

4.1. Алгоритм

Ранее было показано, что путём симулирования ММК можно оценить возможность движения к КС: симулируем движение и смотрим на количество траекторий, по которым происходит превышение порога. Теперь исследуем поведение катамарана в фазовом пространстве при движении к критическим состояниям, не прибегая к ММК. Можно получить оценки значений квазипотенциалов, вероятностей используя операцию проецирования на исследуемый А-профиль.

Пусть задан порог φ_f и к нему построен А-профиль φ^* . Проведём вычисление расстояний H_{φ^*} и кортежей z в ограниченном множестве Y^n фазового пространства. Рассматриваем точки $y_i \in Y^n \subset \mathbb{R}^n$, $i = 1, 2, \dots, N_Y$ (где N_Y – количество узлов сетки, с учётом размерностей) и считаем $H_{\varphi^*}(y_i)$. В результате чего имеем последовательность кортежей $Z(y) = \{z_-(y_-), \dots, z_f(y_i), \dots, z^-(y^-)\}$, где y_- и y^- – нижняя и верхняя грани множества Y^n , которую можно соотнести с фазовой плоскостью объекта (и вообще говоря, модели возмущения) для изучения его поведения при движении к КС.

4.2. Пример

Проиллюстрируем алгоритм на плоскости для крена в 6° . Зададим сетку узлов по двум состояниям $y_i \in [y_-, y^+] = Y^2 \subset \mathbb{R}^2$ (где векторы $y_- = [y_{1-}, y_{2-}]$, $y^+ = [y_{1+}, y_{2+}]$ указывают границы сетки). Алгоритм получает на вход $\varphi_f = 6$, векторы y_- , y^+ и N_Y . Строим А-профиль φ_i^* к φ_f . По сетке узлов выполняем проецирование $H_{\varphi^*}(y_i)$.

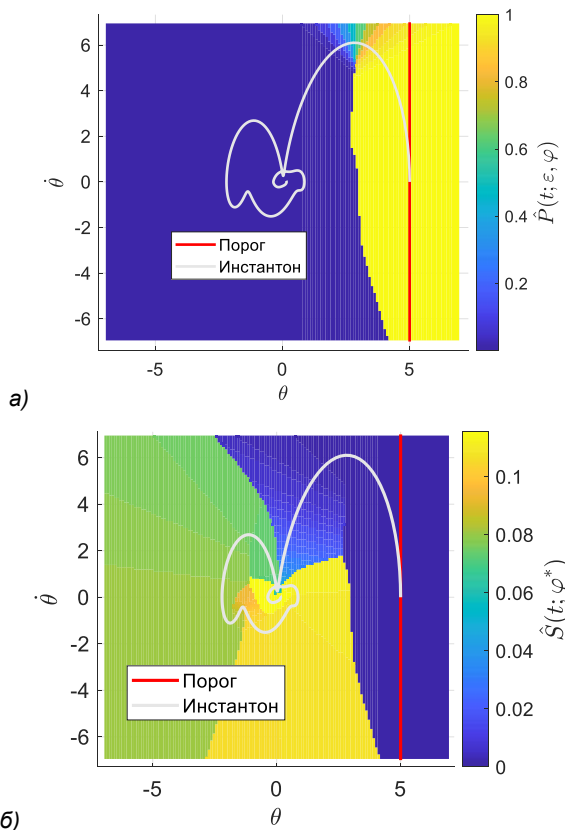


Рис. 10. Оценки вероятностей (а) и квазипотенциалов (б) движения вдоль инстантона к критическому состоянию крена 6 градусов (красная линия). Белой линией указан инстантон.

Из кортежа выбираем, например, оценки вероятностей и рисуем их в соответствующих координатах: получаем информацию о тех областях фазового пространства, из которых вероятность движения вдоль профиля будет высокой или низкой (рис. 10а). Синим цветом – область низкой вероятности превысить порог, а жёлтым – высокой. Но поскольку оценка вероятности зависит от ϵ можно рассматривать ещё и оценку квазипотенциала (рис. 10б).

5. Обсуждение

Траектории наиболее вероятного движения могут быть использованы для понимания того, как будут происходить нежелательные движения в разных условиях. Это может быть полезно при проектировании судна и систем управления ими. Результаты, полученные построением инстантонов, совпадают с тем, что можно получить методом Монте-Карло.

Оценки вероятностей на фазовой плоскости могут дополнять динамические и статические диаграммы

остойчивости, поскольку несут информацию о рисках, которые могут возникнуть с учётом внешних возмущений. Диаграммы устойчивости вычисляются исходя из физических законов, геометрии корпуса судна, в то время как описанные процедуры получения оценки вероятностей строятся по отношению ко всему судну и его системы управления, вероятностных характеристик ветро-волновых возмущений, склонности к риску исследователя. Эти оценки несут полезность как оценки риска движения и могут меняться в зависимости от погодных условий, качества используемых математических моделей судна и внешних возмущающих явлений.

При этом необходимо учитывать погрешности, которые могут возникать при линеаризации модели, асимптотическую природу используемых методов.

Приведённые алгоритмы могут использоваться для разработки систем супервизорного управления [8-13] или при планировании переходов в море. Ближайшим примером последнего может служить объединение двух систем GULLIVER и FREDYN [14]. Первая делает расчёт учитывая ветро-волновые характеристики моря на переходе, а вторая симуляцию судна исходя из его загрузки. Результатом моделирования является диаграмма прогноза риска в зависимости от уровня загрузки судна, скорости его движения, значимой высоты волны, периода волны. При оценке редких событий симуляция может быть затруднена и тогда

использование представленных выше оценок предполагается эффективным.

Заключение

В статье показаны результаты применения теории больших уклонений для расчёта наиболее вероятных траекторий движения к критическим углам крена катамарана.

Показан алгоритм оценки скорости убывания вероятностей компонентов вектора состояний в критических значениях. Алгоритм основан на получении значений оценок квазипотенциалов по семейству А-профилей к нескольким критическим состояниям.

Показан алгоритм оценки вероятностей движения вдоль инстантонов к критическим состояниям из разных состояний фазовой плоскости. Алгоритм может быть использован для построения системы супервизорного управления движением и контроля мореходности, системы поддержки принятия решений при оценке рискованности совершения манёвров.

Сравнение результатов работы алгоритмов с результатами, полученными методом Монте-Карло, показало адекватность методов. Но скорость получения результатов по описанным алгоритмам значительно выше, чем при применении алгоритмов, основанных на метод Монте-Карло.

Дополнительная информация

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021

The research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the basic part of the state order № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021.

Литература

1. James L. Beck, Konstantin M. Zuev. Rare Event Simulation [Текст]. Handbook of Uncertainty Quantification: сб. науч. тр. NY.: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-12385-1_24
2. Kramar V. Development of the particular vessel mathematical models. – Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 27 (1), pp. 34-39.
3. Kramar V. Investigation of Changes and Development of Mathematical Model for a Drilling Vessel. Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-07-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. PP.49-55. DOI:10.2507/26th.daaam.proceedings.007.
4. T.I. Fossen. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Jhon Wiley & Sons, 2011, 575 p. ISBN 978-1-119-99149-6.
5. V. Semyonov-Tyan-Shansky. Statics and Dynamics of the Ship: Theory of Buoyancy, Stability and Launching. – University Press of the Pacific, 2004. 596 p. ISBN 10: 1410212882.
6. Вентцель А.Д., Фрейдлин М.И. Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений. – М.: Наука, 1979. 424 с.
7. T. Grafke, E.V. Eijnden. Numeric computation of rare events via large deviation theory [Текст]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science: сб. науч. тр. 2019. DOI: 29. 063118. 10.1063/1.5084025.
8. Дубовик С.А. Функционально устойчивые системы управления [Текст]: асимптотические методы синтеза: монография / С. А. Дубовик, А. А. Кабанов; Севастопольский государственный университет. – М.: ИНФРА-М, 2019. 248 с.: ил.
9. Kabanov A., Kramar V., Lipko I. Motion Control of Catamaran-type Floating Station for Gripping the AUV. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271581
10. Dubovik S.A., Kabanov A.A., Lipko I.U. Situational Control in Stochastic Systems. Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, 2019. PP. 64-68.
11. Липко, И. Ю. К вопросу о прогнозировании с использованием принципа больших уклонений. Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2017: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Севастополь. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 46-50.

12. Lipko I. Forecasting of catamaran roll threshold exceeding. 2018 International Russian Automation Conference. 2018. № 8501764, DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501764.
13. Kramar V. The Construction Principle and System Architecture of the Automatic Hold System of an Unmanned Vessel. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602791.
14. E.F.G. van Daalen, J.J. Blok, H. Boonstra. Capsize Probability Analysis for a Small Container Vessel [Текст]. Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves: сб. науч. тр. – London: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-1482-3_28.

References

1. James L. Beck, Konstantin M. Zuev. *Rare Event Simulation*. In book: Handbook of Uncertainty Quantification. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-12385-1_24.
2. Kramar, V. *Development of the particular vessel mathematical models*. 2016, Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 27 (1), pp. 34-39.
3. Kramar V. *Investigation of Changes and Development of Mathematical Model for a Drilling Vessel*. Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-07-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. 49-55. 10.2507/26th.daaam.proceedings.007.
4. Fossen T.I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Jhon Wiley & Sons, 2011, 575 p. ISBN 978-1-119-99149-6.
5. Semyonov-Tyan-Shansky V. *Statics and Dynamics of the Ship: Theory of Buoyancy, Stability and Launching*. University Press of the Pacific, 2004, ISBN 10: 1410212882.
6. Вентцель А.Д., Фрейдлин М.И., Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений, 1979.
7. Grafke T., Eijnden E.V. *Numeric computation of rare events via large deviation theory*. 2019. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 29. 063118. 10.1063/1.5084025.
8. Dubovik S. A., Kabanov A. A. *Funkcional'no ustojchivye sistemy upravleniya: asimptoticheskie metody sinteza* [Functionally stable control systems: asymptotic methods of synthesis]. Moscow, INFRA-M, [In Russian]. 2019. DOI: 10.12737/monography_5b446a985cf9a5.11626044.
9. Kabanov A., Kramar V., Lipko, I. *Motion Control of Catamaran-type Floating Station for Gripping the AUV*. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271581.
10. Dubovik S.A., Kabanov, A.A., Lipko, I.U. *Situational Control in Stochastic Systems*. Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, 2019, pp. 64-68.
11. Lipko I. *K voprosu o prognozirovanii s ispol'zovaniem printsipa bol'shikh ukloneniy* [In a question about a forecasting with help of large deviation principle]. Sevastopol, 2017. S. 46-50.
12. Lipko I. Forecasting of catamaran roll threshold exceeding. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, № 8501764, DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501764.
13. Kramar V. *The Construction Principle and System Architecture of the Automatic Hold System of an Unmanned Vessel*. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602791.
14. E.F.G. van Daalen, Blok J.J., Boonstra H. *Capsize Probability Analysis for a Small Container Vessel*. In book: Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves. 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-1482-3_28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иван Юрьевич Липко, старший преподаватель кафедры «Информатика и управление в технических системах», научный сотрудник НОЦ «Мехатроника и робототехника», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: ivanlipko@yandex.ru

Ivan U. Lipko, Senior Lecturer of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Research Officer of Research and Education Center "Mechatronics and robotics" Sevastopol State University, Universitetskaya str, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ivanlipko@yandex.ru

Поступила в редакцию: 13.10.2021
Принята к публикации: 02.11.2021

Формирование и оптимизация издержек производственной рыбодобывающей деятельности судов

С.В. Лисиенко¹, e-mail: lisienkosv@mail.ru, Н.С. Иванко¹, e-mail: ivns@mail.ru

¹ Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В работе рассмотрен процесс формирования производственных издержек в трех различных сценариях промысловой обстановки, описаны издержки, возникающие в каждом из сценариев. Выполнена оценка вероятности наступления того или иного сценария промысловой обстановки. Сформулирован подход к определению средневзвешенных издержек судна. Сформулирован подход для определения средневзвешенного улова судна на основании многолетних данных о добыче промыслового объекта. Данная оценка может быть использована при планировании работы добывающего судна. Полученные значения средневзвешенных затрат подсистем «добыча» и «обработка» производственного процесса на добывающем судне, а также средневзвешенное значение суточного вылова использованы в задаче оптимизации режима обработки суточного вылова с условием минимизации затрат. Приведен пример расчета среднесуточного вылова и решение оптимизационной задачи для промыслового объекта сардина иваси.

Ключевые слова: Промышленное рыболовство, средневзвешенный вылов, производственные издержки, добыча водных биологических ресурсов, математическая модель промысла, оптимизация.

Formation and optimization of costs of production fishing activity of vessels

Svetlana V. Lisienko¹, e-mail: lisienkosv@mail.ru Nina S. Ivanko¹, e-mail: ivns@mail.ru

¹Far Eastern state technical fishery University

Abstract. The paper considers the process of forming production costs in three different scenarios of the fishing situation, describes the costs arising in each of the scenarios. The probability of occurrence of a particular scenario of the fishing situation is estimated. An approach to determining the weighted average costs of a vessel is formulated. An approach is formulated to determine the weighted average catch of a vessel based on long-term data on the production of a fishing object. This assessment can be used when planning the operation of a mining vessel. The obtained values of the weighted average costs of the subsystems "production" and "processing" of the production process on the producing vessel, as well as the weighted average value of the daily catch, are used in the task of optimizing the processing mode of the daily catch with the condition of minimizing costs. An example is given of calculating the average daily catch and solving the optimization problem for the sardine ivasi fishing object.

Keywords: Industrial fishing, weighted average catch, production costs, extraction of aquatic biological resources, mathematical model of fishing, optimization.

Введение

Повышение эффективности отечественного рыболовства напрямую зависит от совершенствования методов и способов организации и планирования рыбодобывающей деятельности. Производственный процесс на добывающем судне с законченным производственным циклом осуществляется в двух подсистемах основного производства: «добыча» - «обработка». Этими подсистемами определяется промыслово-технологический режим его работы, организация, планирование и оптимизация которого непосредственно связаны с установлением оптимального плана распределения сырца по всем видам обработки. Исходными данными для этого служат показатели рейсового задания по добыче сырца, прогноз промысловой обстановки и производственные возможности судна по выпуску различных видов продукции.

Процесс добычи сырца характеризуется значительным числом неустойчивых факторов, накладывающих на него ограничения и изменяющих условия промысла при работе судна в реальных условиях [1-5,7,8]. Совокупность таких факторов приводит к увеличению затрат (издержек) на всех режимах работы судна, оказывающих негативное влияние на эффективность рыбодобывающего процесса. Учитывая сценарный подход к развитию промысловой обстановки, характеризующейся ее

стабильностью или нестабильностью, возникает крайняя необходимость в исследовании процессов формирования всех видов издержек для последующей их оптимизации с целью достижения устойчивости производственной деятельности рыбодобывающей деятельности [6,9-11].

1. Постановка задачи оптимизации издержек

На всем протяжении процесса добычи и обработки улова в течение суток в подсистемах «добыча» и «обработка» присутствуют постоянные издержки ($Z_{\text{пи}}$). Они представляют собой сумму издержек добычи ($Z_{\text{ид}}$) и издержек обработки ($Z_{\text{ио}}$):

$$Z_{\text{пи}} = Z_{\text{ид}} + Z_{\text{ио}}.$$

При стабильной промысловой обстановке, когда объем суточного вылова (B) приблизительно равен мощности технологического оборудования обработки по всем видам продукции (M), постоянные издержки являются общими промысловыми издержками, т.е. $Z = Z_{\text{пи}}$.

При нестабильной промысловой обстановке, когда суточный вылов превышает мощности технологического оборудования обработки по всем видам продукции, т.е. $B > M$ возникают дополнительные издержки $Z_{\text{дизс}}$, связанные с обработкой и хранением запасов сырца. В этом случае общие промысловые издержки являются совокупностью постоянных и дополнительных издержек, т.е. $Z = Z_{\text{пи}} + Z_{\text{дизс}}$.

Аналогично, при нестабильной промысловой обстановке, когда суточный вылов не достигает мощности технологического оборудования обработки по всем видам продукции, имеют место дополнительные издержки дефицита сырья $Z_{дидс}$, связанные с отсутствием сырья для передачи в обрабатывающую подсистему. В этом случае общие промысловые издержки состоят из постоянных и дополнительных издержек, т.е. $Z = Z_{пи} + Z_{дидс}$.

Таким образом, суточные затраты судна принимают одно из четырех значений:

$$Z = \begin{cases} Z_{пи}, & \text{если } M = B, \\ Z_{пи} + Z_{дидс}, & \text{если } B > M, \\ Z_{пи} + Z_{дидс}, & \text{если } B < M. \end{cases} \quad (1)$$

Суточный объем вылова можно рассматривать как дискретную случайную величину, принимающую 3 возможных значения. На основании статистических данных о работе судов можно определить вероятности возникновения каждого события. Введем обозначения:

P_0 – вероятность получения суточного вылова равного мощности технологических линий,

P_1 – вероятность получения суточного вылова больше мощности технологических линий,

P_2 – вероятность получения суточного вылова меньше мощности технологических линий, или отсутствия суточного вылова.

Тогда средневзвешенное значение суточных издержек судна равно

$$Z_{ср} = Z_{пи}P_0 + (Z_{пи} + Z_{дидс})P_1 + (Z_{пи} + Z_{дидс})P_2.$$

Анализ многолетних данных суточных выловов показал что стабильная промысловая обстановка наблюдалась только в 5-8% промысловых дней, т.е. $P_0 = 0,05 \dots 0,08$.

Нестабильная промысловая обстановка с дефицитом сырья имеет наибольший удельный вес, при этом вероятность P_1 равна $0,7 \dots 0,85$, а нестабильная промысловая обстановка с формированием запаса имела место в 7-25% промысловых дней, т.е. $P_2 = 0,07 \dots 0,25$.

Таким образом, средневзвешенное значение суточных издержек имеет вид:

$$Z_{ср} = (0,05 \dots 0,08)Z_{пи} + (0,7 \dots 0,85)(Z_{пи} + Z_{дидс}) + (0,07 \dots 0,25)(Z_{пи} + Z_{дидс}). \quad (2)$$

Для выполнения оценки средневзвешенных затрат необходимо оценить средневзвешенный суточный вылов.

2. Средневзвешенная оценка суточного вылова

Для оценки среднесуточного ожидаемого вылова используется математическая статистика и формула средневзвешенного значения:

$$A_{ср} = a_0p_0 + a_1p_1 + a_2p_2 + \dots + a_n p_n$$

где a_i – i -тая оценка среднесуточного вылова,

p_i – вероятность получения суточного улова в размере a_i .

Выборочная совокупность для оценки среднесуточного ожидаемого вылова это множество суточных выловов некоторого промыслового объекта, добываемого судами определенного типа за многолетний период. Для упрощения расчетов выборочную совокупность представим в виде интервального вариационного ряда. Размах вариации на основании анализа данных суточных

выловов равен $1,6M$, шаг интервального ряда равен $0,2M$.

В качестве значений a_i взяты середины интервального ряда соответствующего долям мощности технологических линий M .

Таблица 1

Интервальный вариационный ряд

Интервал	Оценка a_i	Описание
[0; 0,2M]	0,1M	возникает дефицит сырья
[0,2M; 0,4M]	0,3M	возникает дефицит сырья
[0,4M; 0,6M]	0,5M	возникает дефицит сырья
[0,6M; 0,8M]	0,7M	возникает дефицит сырья
[0,8M; M]	0,9M	идет работа в штатном режиме
[M; 1,2M]	1,1M	идет работа в штатном режиме
[1,2M; 1,4M]	1,3M	формируется запас сырья
[1,4M; 1,6M]*	1,5M	формируется запас сырья

* включает в себя все значения более $1,6M$

Оценка вероятностей p_i производится на основании статистических данных по уловам за выбранный период.

В результате среднесуточный ожидаемый вылов можно представить в виде $\tilde{a} = \eta \cdot M$.

Проведенные расчеты для разных типов судов позволили выявить диапазон значений коэффициента η от 0,4 до 0,56.

Полученное значение средневзвешенных суточных выловов в виде $\tilde{a} = \eta \cdot M$ используется для расчета оптимального выпуска продукции и как следствие период автономности по заполнению трюмов на этапе 2 планирования рейсооборота [5].

3. Оптимизация обработки среднесуточного вылова

Полученная оценка суточного вылова служит для оценки получаемого выпуска продукции путем оптимизации режима обработки улова [2]. Рассмотрим подробно задачу оптимизации обработки вылова в общем виде.

Технологическая линия может производить несколько видов продукции, в общем случае считаем, что это мороженая неразделанная рыба, рыбная мука и разные виды продукции после обработки, например, филе.

Обозначим H – количество тонн рыбы, идущей в заморозку без разделки, C – количество тонн сырца, пущенного на муку, H_i – количество тонн рыбы, идущей на изготовление i -го вида продукции с разделкой, h_i – норма выхода продукции i -го вида из сырца.

Целью оптимизации является минимизация затрат на переработку вылова. Средневзвешенные издержки подсистемы «добыча-обработка» описаны

формулой (2). Пусть $Z_{cp}^0, Z_{cp}^i, Z_{cp}^m$ – затраты на производство неразделенной мороженой рыбы, продукции i -го вида и рыбной муки соответственно, тогда суммарные затраты это $Z_{cp}^0 H + \sum_i Z_{cp}^i h_i H_i + Z_{cp}^m (C + \sum_i (1 - h_i) H_i)$.

Мощность технологических линий M это сумма мощности морозильной установки M_0 и мощности линии производства рыбной муки M_1 . Ограничение по мощности морозильной установки имеет вид: $H + \sum_i h_i H_i \leq M_0$.

Ограничение по мощности установки для выпуска рыбной муки имеет вид: $\sum_i (1 - h_i) H_i + C \leq M_1$, при этом выход муки составит $N_m (\sum_i (1 - h_i) H_i + C)$, где N_m - коэффициент выхода рыбной муки из сырца.

Кроме того, имеются ограничения на распределение суточного вылова по видам продукции: часть улова идет на производство продукции, остальное на выпуск муки. Ограничение по выпуску продукции имеет вид $H + \sum_i H_i \geq k_0 \tilde{a}$, ограничение на выпуск муки $C \leq k_1 \tilde{a}$, при условии $k_0 + k_1 = 1$. Так же имеет место ограничение на обработку всего вылова: $H + \sum_i H_i + C \leq \tilde{a}$.

Таким образом, имеет место задача определения оптимального суточного промышленно-технологического режима:

$$Z_{cp}^0 H + \sum_i Z_{cp}^i h_i H_i + Z_{cp}^m \left(C + \sum_i (1 - h_i) H_i \right) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} H + \sum_i h_i H_i \leq M_0 \\ \sum_i (1 - h_i) H_i + C \leq M_1 \\ H + \sum_i H_i \geq k_0 \tilde{a} \\ C \leq k_1 \tilde{a} \\ H + \sum_i H_i + C \leq \tilde{a} \\ H, H_i, C \geq 0 \end{cases}$$

4. Пример расчетов

Судно типа БМРТ типа «Сотрудничество» имеет технологические линии мощностью 300 тонн (мороженой продукции: 150 т/сут, кормовой рыбной муки и технического жира (по сырью): 150 т/сут).

Интервальный ряд: [0;60] [60;120] [120;180] [180;240] [240;300] [300;360] [360;420] [420;480].

Промысловый объект сардина иваси, год проведения анализа для расчета вероятностей – 2019.

Вероятности соответствующие заданным диапазонам 0,385; 0,193; 0,111; 0,052; 0,074; 0,074; 0,089; 0,022. Т.е. удельный вес суточных выловов соответствующих нестабильной промысловой обстановки с дефицитом сырья, вариант отсутствия сырья или добычи его в небольших (относительно мощностей технологических линий) объемах является наибольшим и для судов типа БМРТ составил 38,5%.

Таблица 2

Интервальный вариационный ряд для промыслового объекта сардина иваси и судна типа БМРТ

Интервал	Оценка a_i	Вероятность p_i
[0; 60]	30	0,385
[60; 120]	90	0,193
[120; 180]	150	0,111
[180; 240]	210	0,052
[240; 300]	270	0,074
[300; 360]	330	0,074
[360; 420]	390	0,089
[420; 480]	450	0,022

Расчет $A_{cp} = 30 \cdot 0,385 + 90 \cdot 0,193 + 150 \cdot 0,111 + 210 \cdot 0,052 + 270 \cdot 0,074 + 330 \cdot 0,074 + 390 \cdot 0,089 + 420 \cdot 0,022 = 145,55$.

Таким образом, средневзвешенная оценка суточного вылова судна типа БМРТ типа "Сотрудничество" составляет 144,55 т при мощности технологических линий 300 т в сутки. Эту оценку можно выразить как $\tilde{a} = \frac{144,55}{300} M = 0,485M$, т.е. $\eta = 0,485$.

Аналогичный расчет для судов типа СРТМ с мощностью технологических линий 40т/сутки средневзвешенного суточного вылова составляет 22 т, коэффициент $\eta = 0,55$.

Для промыслового объекта сардина иваси технологические линии работают на выпуск двух видов продукции: мороженая неразделенная и рыбная мука.

Таким образом, сырец делится на две части, H – количество тонн рыбы, идущей в заморозку без разделки, C – количество тонн сырца, пущенного на муку. Оптимизационная задача принимает вид:

$$Z_{cp}^0 H + Z_{cp}^m C \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} H \leq M_0 \\ C \leq M_1 \\ H \geq k_0 \tilde{a} \\ C \leq k_1 \tilde{a} \\ H + C \leq \tilde{a} \\ H, C \geq 0 \end{cases}$$

Множество допустимых решений полученной задачи линейного программирования представляет собой единственную точку.

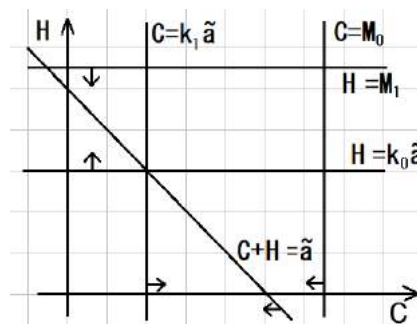


Рис. 1. Множество допустимых решений.

Т.е. минимизация затрат достигается при соблюдении заданного баланса выпуска мороженой неразделанной рыбы $H = k_0 \tilde{a}$ и муки $C = k_1 \tilde{a}$. Затраты составят $Z_{cp}^0 k_0 \tilde{a} + Z_{cp}^m k_1 \tilde{a}$.

Заключение

Представленная оптимизационная задача по определению оптимального суточного промыслово-технологического режима промыслового судна, критерием оптимизации которой является минимизация его общих промысловых издержек, формирующихся при сценарном развитии промысловой обстановки, учитывает этапы их

последовательного формирования в промыслово-технологической цепи посредством соотношения средневзвешенного суточного вылова к суточной обработке сырца через оценку средневзвешенных затрат, возникающих в производственных подсистемах рыбодобывающего судна. Такой подход является наиболее приемлемым при планировании рейсового задания и производственного плана промыслового судна, т.к. придает определенную устойчивость и детерминированность всей исследуемой рыбопромысловой системе в процессе организации и планирования добывающей деятельности.

Литература

1. Андреев М. Н., Студенецкий С. А. Оптимальное управление на промысле. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288 с.
2. Дверник А.В. Технология и управление промышленным рыболовством: Учебное пособие. М.: МОРКНИГА, 2013. – 318 с.
3. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Моделирование процессов ведения рыбодобывающей деятельности в многовидовой промысловой системе "промысловая зона рыбохозяйственного бассейна" при статической постановке оптимизационной задачи (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна) // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 253-259.
4. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Оптимизация рыбодобывающей деятельности в многовидовых промысловых системах - промысловых зонах в статическом их состоянии с учетом биотехнологического дуализма (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна) // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1 (50). С. 230-237.
5. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Планирование рейсооборота добывающих судов//Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 2 (53). С. 200-208.
6. Мойсеенко С. С., Мейлер Л. Е. Рыбопромышленная логистика. Монография/Калининград.: изд-во БГРАФ, 2016. – 174 с.
7. Мойсеенко С. С., Мороз Е. О. Оптимизация системы транспортного обслуживания рыболовных судов // Морские интеллектуальные технологии, № 4(42), т. 3, 2018, с.168-176.
8. Мельников В.Н., Мельников А. В. Совершенствование общей теории промышленного рыболовства //Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2010. № 1. с.42-53.
9. Мельников В.Н. Общая характеристика основных видов математических моделей теории рыболовства//Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2009. № 1. С. 17-22.
10. Taleizadeh AA, Wee H-M, Jalali-Naini SG (2013) Economic production quantity model with repair failure and limited capacity. Appl Math Model 37:2765–3277 <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.001>
11. Kuppulakshmi, V., Sugapriya, C. & Nagarajan, D. Economic fish production inventory model for perishable fish items with the deterioration rate and the added value under pentagonal fuzzy number. Complex Intell. Syst. 7, 417–428 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00222-8>

References

1. Andreev M. N., Studenetskiy S. A. Optimal'noe upravlenie na promysle [Optimal management in the field]. – М.: Pishchevaya promyshlennost', 1975. – 288 s.
2. Dvernik A.V. Tekhnologiya i upravlenie promyshlennym rybolovstvom [Technology and management of industrial fishing]: Uchebnoe posobie. М.: MORKNIGA, 2013. – 318 s.
3. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modelirovanie protsessov vedeniya rybodobyvayushchey deyatel'nosti v mnogovidovoy promyslovoy sisteme "promyslovaya zona rybokhozyaystvennogo basseyna" pri staticheskoy postanovke optimizatsionnoy zadachi (na primere Severo-Kuril'skoy zony Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna)[Modeling of the processes of conducting fishing activities in the multi-species fishing system "fishing zone of the fishing basin" in the static formulation of the optimization problem (on the example of the North Kuril zone of the Far Eastern fishing basin)] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 3-1 (49). S. 253-259.
4. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Optimizatsiya rybodobyvayushchey deyatel'nosti v mnogovidovykh promyslovykh sistemakh - promyslovykh zonakh v staticheskom ikh sostoyanii s uchetom biotekhnologicheskogo dualizma (na primere Severo-Kuril'skoy zony Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna) [Optimization of fishing activity in multi-species fishing systems-fishing zones in their static state, taking into account biotechnological dualism (on the example of the North-Kuril zone of the Far Eastern fisheries basin)] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-1 (50). S. 230-237.
5. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Planirovanie rejsooborota dobyvayushchih sudov [Planning of the voyage turnover of producing vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii 2021. № 2-1 (53). S. 200-208.
6. Moyseenko S. S., Meyler L. E. Rybopromyshlennaya logistika [Fishing logistics]. Monografiya/Kaliningrad.: izd-vo BGRAF, 2016. – 174 s.

7. Moysenko S. S., Moroz E. O. Optimizatsiya sistemy transportnogo obsluzhivaniya rybolovnykh sudov [Optimization of the transport service system of fishing vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii [Optimization of the transport service system of fishing vessels], № 4(42), t. 3, 2018, s.168-176.
8. Mel'nikov V.N., Mel'nikov A. V. Sovershenstvovanie obshchey teorii promyshlennogo rybolovstva [Perfection of the general theory of industrial fishery]//Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo. 2010. № 1. s.42-53.
9. Mel'nikov V.N. Obshchaya harakteristika osnovnykh vidov matematicheskikh modelej teorii rybolovstva [General characteristic of basic types of mathematical models of the fishery theory]//Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo. 2009. № 1. S. 17-22.
10. Taleizadeh AA, Wee H-M, Jalali-Naini SG (2013) Economic production quantity model with repair failure and limited capacity. Appl Math Model 37:2765–3277 <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.001>
11. Kuppulakshmi, V., Sugapriya, C. & Nagarajan, D. Economic fish production inventory model for perishable fish items with the deterioration rate and the added value under pentagonal fuzzy number. Complex Intell. Syst. 7, 417–428 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00222-8>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Светлана Владимировна Лисиенко, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Svetlana V. Lisienko, Ph. D. (Econ), Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern state technical fishery University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Нина Сергеевна Иванко, аспирант кафедры промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: invs@mail.ru

Nina S. Ivanko, graduate student of the Chair of Industrial Fisheries? Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B e-mail: invs@mail.ru

Поступила в редакцию: 23.08.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

УДК 639.2.081, 66.012, 621.337.1, 550.34.01, 004.032.26 <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.057>

Критерии мультифизического подобия тралового комплекса

А.А. Недоступ¹, e-mail: nedostup@klgtu.ru, А.О. Ражев¹, e-mail: progacpp@live.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. При решении основных задач проектирования и управления тралового комплекса, характеризующие: механические; гидродинамические; грунтодинамические; трибологические; электродинамические; термодинамические; световые; акустические и оптические процессы возникает необходимость обеспечения критериев подобия соответствующих процессов, выполнение автомодельности для сокращения параметров, влияющих на выходные характеристики тралового комплекса. В данной статье рассмотрены критерии мультифизического подобия траловых комплексов (донного и разноглубинного). Критерии мультифизического подобия тралового комплекса определены с помощью теории мультифизического подобия тралового комплекса. В результате были теоретически обоснованы критерии мультифизического подобия тралового комплекса, на основе которых была разработана программа для ЭВМ «Критерии мультифизического подобия процессов рыболовства».

Ключевые слова: критерий подобия, мультифизическое подобие, масштабы, траловый комплекс, компьютерная программа

Criteria for multiphysical similarity of the trawl complex

Alexander A. Nedostup¹, e-mail: nedostup@klgtu.ru, Aleksey O. Razhev¹, e-mail: progacpp@live.ru

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. When solving the main problems of design and control of the trawl complex, characterizing: mechanical; hydrodynamic; soil-dynamic; tribological; electrodynamic; thermodynamic; light; acoustic and optical processes, it becomes necessary to provide similarity criteria for the corresponding processes, to perform self-similarity to reduce the parameters that affect the output characteristics of the trawl complex. This article discusses the criteria for the multiphysical similarity of trawl complexes (bottom and midwater). The criteria for the multiphysical similarity of the trawl complex are determined using the theory of the multiphysical similarity of the trawl complex. As a result, the criteria of the multiphysical similarity of the trawl complex were theoretically substantiated, on the basis of which the computer program «Criteria for the multiphysical similarity of fishing processes» was developed.

Keywords: Criterion similarity, multiphysical modeling, scales, trawl complex, computing program

Введение

При решении основных задач проектирования и управления тралового комплекса, характеризующие: механические; гидродинамические; грунтодинамические; трибологические; электродинамические; термодинамические; световые; акустические и оптические процессы возникает необходимость обеспечения критериев подобия соответствующих процессов, выполнение автомодельности для сокращения параметров, влияющих на выходные характеристики тралового комплекса [1,2]. Для всех процессов мультифизического подобия тралового комплекса (механических; гидродинамических; грунтодинамических; трибологических; электродинамических; термодинамических; световых; акустических и оптических) необходимо выявить новые комбинации из критериев подобия, которые минимизируют само мультифизическое подобие тралового комплекса. Важно учитывать автомодельность параметров тралового комплекса, на основании которой возможно сократить число критериев мультифизического подобия, а также управлять величиной масштабного эффекта [1].

Когда уравнения, описывающие физическое явление, неизвестны (в нашем случае существуют), критерии подобия отыскиваются при помощи анализа размерностей, определяющих физические параметры [3]. Задача предсказательного моделирования величины масштабного эффекта является приоритетной, так как пересчет с поправкой (масштабным эффектом) позволяет точно рассчитывать характеристики натурального тралового

комплекса или его модели. При этом отметим, что выполнение критериев подобия не является достаточным условием мультифизического подобия тралового комплекса, так как к ним относятся краевые, граничные и начальные условия. Выполнение же всех условий является условием динамического, мультифизического подобия тралового комплекса.

1. Цель и задачи

Цель настоящих исследований заключается в определении основных критериев мультифизического подобия траловых комплексов (донного и разноглубинного), а также в минимизации величины масштабного эффекта.

К задачам исследования относятся:

- вывод критериев мультифизического подобия траловых комплексов (донного и разноглубинного);
- разработка программы для ЭВМ «Критерии мультифизического подобия процессов рыболовства» с использованием масштабов подобия, идентичных применяемым при разработке программы для ЭВМ «Масштабы мультифизического подобия процессов рыболовства» [4].

В данном научном исследовании авторами продолжается исследование методов физического, математического и компьютерного моделирования процессов, протекающих в системе «судно-трал» и в траловом комплексе (донном и разноглубинном) с целью создания тренажерного комплекса тралового лова (см. рис. 1), назначение которого описано в [5].

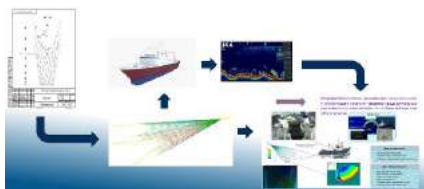


Рис. 1. Блоки тренажера симуляции тралового лова

Критерии мультифизического подобия тралового комплекса определим при помощи анализа размерностей [6,7].

2. Материалы и методы

Рассмотрим масштабы подобия, приведенные в [8], через масштаб геометрических характеристик C_l :

- механических величин;
- гидродинамических величин;
- грунтодинамических величин;
- трибологических величин;
- электродинамических величин;
- термодинамических величин;
- световых величин;
- акустических величин;
- оптических величин.

Критерии подобия процессов тралового комплекса определим на основании теории размерности физических величин. Настоящий способ является простым и отвечает всем предъявляемым к нему требованиям. Он основывается на сокращении размерностей физических величин. При этом обеспечивает выполнение главных условий - отношений параметров. Главное свойство такого метода заключается в том, что в некоторых случаях не известны уравнения процессов, протекающих в траловых комплексах, не говоря о мультифизических процессах, но известно преобразование физической величины через масштаб геометрических характеристик C_l , и тем самым число критериев подобия может быть получено любое. Важно определить основные критерии мультифизического подобия.

В таблицах 1 - 7 приведены основные критерии мультифизического подобия тралового комплекса с учетом преобразования физических величин относительно масштаба C_l [8]. Выражения через масштаб C_l (крайний столбец таблицы) служат проверкой полученных отношений. Критерий (числа) подобия в масштабном виде производительности сил H в соответствии с теорией подобия равен 1 [9].

Таблица 1
Основные критерии (числа) подобия механических, гидродинамических, грунтодинамических и трибологических величин

Критерии (числа) подобия		Преобразование через масштаб C_l
Название критерия (числа)	Обозначение в индикаторном виде	
Критерий (число) Ньютона	$Ne \rightarrow \frac{C_R C_l^2}{C_m C_l}$, $Ne \rightarrow \frac{C_R}{C_\rho C_l^2 C_v^2}$	$\frac{C_l^{3/2} (C_l^{5/4})^2}{C_l^3 C_l} = 1$

		$\frac{C_l^{3/2}}{C_l^2 (C_l^{-1/4})^2} = 1$
Критерий (число) Эйлера	$Eu \rightarrow \frac{C_{\Delta p}}{C_\rho C_v^2}$	$\frac{C_l^{-1/2}}{(C_l^{-1/4})^2} = 1$
Критерий (число) Фруда	$Fr \rightarrow \frac{C_v^2}{C_g C_l}$, $Fr \rightarrow \frac{C_v^2}{C_w C_l}$	$\frac{(C_l^{-1/4})^2}{C_l^{-3/2} C_l} = 1$, $\frac{(C_l^{-1/4})^2}{C_l^{-3/2} C_l} = 1$
Критерий (число) Струхала	$Sh \rightarrow \frac{C_f C_l}{C_v}$	$\frac{C_l^{-5/4} C_l}{C_l^{-1/4}} = 1$
Критерий (число) Рейнольдса	$Re \rightarrow \frac{C_l C_v}{C_v}$	$\frac{C_l C_l^{-1/4}}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Рошко	$Rk \rightarrow \frac{C_f C_l^2}{C_v}$	$\frac{C_l^{-5/4} C_l^2}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Руарка	$Ru \rightarrow \frac{C_\rho C_v^2}{C_p}$	$\frac{(C_l^{-1/4})^2}{C_l^{-1/2}} = 1$
Критерий (число) Прандтля	$Pr \rightarrow \frac{C_v}{C_\alpha}$	$\frac{C_l^{3/4}}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Стокса	$Sk \rightarrow \frac{C_\rho C_l C_v}{C_\mu C_l}$	$\frac{C_l^2 C_l^{-1/4}}{C_l^{3/4} C_l} = 1$
Критерий (число) Бринкмана	$Br \rightarrow \frac{C_\mu C_v^2}{C_\chi C_{\Delta T}}$	$\frac{C_l^{3/4} (C_l^{-1/4})^2}{C_l^{-5/4} C_l^{3/2}} = 1$
Критерий (число) Кирпичева	$Ki \rightarrow \frac{C_\rho C_R}{C_\mu^2}$	$\frac{C_l^{3/2}}{(C_l^{3/4})^2} = 1$
Критерий (число) Лапласа	$La \rightarrow \frac{C_\sigma C_\rho C_l}{C_\mu^2}$	$\frac{C_l^{1/2} C_l}{(C_l^{3/4})^2} = 1$
Критерий (число) Вебера	$We \rightarrow \frac{C_\rho C_l C_v^2}{C_\sigma}$	$\frac{C_l (C_l^{-1/4})^2}{C_l^{1/2}} = 1$
Критерий (число) Коши	$Ca \rightarrow \frac{C_\rho C_v^2}{C_{Kc}}$	$\frac{(C_l^{-1/4})^2}{C_l^{-1/2}} = 1$
Критерий (число) Эккерта	$Ec \rightarrow \frac{C_v^2}{C_c C_{\Delta T}}$	$\frac{(C_l^{-1/4})^2}{C_l^{-2} C_l^{3/2}} = 1$
Критерий (число) Экмана	$Ek \rightarrow \frac{C_v}{C_f C_l^2}$	$\frac{C_l^{3/4}}{C_l^{-5/4} C_l^2} = 1$
Критерий (число) капиллярности	$Cp \rightarrow \frac{C_\mu C_v}{C_\sigma}$	$\frac{C_l^{3/4} C_l^{-1/4}}{C_l^{1/2}} = 1$
Критерий теории упругости	$\Pi^{El} \rightarrow \frac{C_R}{C_E C_l^2}$	$\frac{C_l^{3/2}}{C_l^{-1/2} C_l^2} = 1$

Критерий твердости материала	$\Pi^{HB} \rightarrow \frac{C_{HB}}{C_p}$	$\frac{C_l^{-1/2}}{C_l^{-1/2}} = 1$
Критерий процесса трения (износа) трибопар	$\Pi_1^{We} \rightarrow \frac{C_v C_\mu}{C_l C_p}$	$\frac{C_l^{-1/4} C_l^{3/4}}{C_l C_l^{-1/2}} = 1$
	$\Pi_2^{We} \rightarrow \frac{C_v C_\rho C_l}{C_\mu}$	$\frac{C_l^{-1/4} C_l}{C_l^{3/4}} = 1$

Таблица 2

Основные критерии подобия электродинамических величин

Критерии подобия		Преобразования через масштаб C_l
Критерии подобия	Обозначение в индикаторном виде	
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_1^E \rightarrow \frac{C_U}{C_l C_{Rc}}$	$\frac{C_l^{-1/4}}{C_l^{3/2} C_l^{-7/4}} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_2^E \rightarrow \frac{C_L}{C_l C_{Rc}}$	$\frac{C_l^{-1/2}}{C_l^{5/4} C_l^{-7/4}} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_3^E \rightarrow \frac{C_C C_{Rc}}{C_G C_L}$	$\frac{C_l^3 C_l^{-7/4}}{C_l^{7/4} C_l^{-1/2}} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_4^E \rightarrow \frac{C_l C_t}{C_U C_C}$	$\frac{C_l^{3/2} C_l^{5/4}}{C_l^{-1/4} C_l^3} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_5^E \rightarrow \frac{C_t}{C_{Rc} C_C}$	$\frac{C_l^{5/4}}{C_l^{-7/4} C_l^3} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_6^E \rightarrow \frac{C_l C_L}{C_U C_t}$	$\frac{C_l^{3/2} C_l^{-1/2}}{C_l^{-1/4} C_l^{5/4}} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_7^E \rightarrow \frac{C_\omega C_L}{C_{Rc}}$	$\frac{C_l^{-5/4} C_l^{-1/2}}{C_l^{-7/4}} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_8^E \rightarrow \frac{C_U}{C_l C_L C_\omega}$	$\frac{C_l^{-1/4}}{C_l^{3/2} C_l^{-1/2} C_l^{-5/4}} = 1$
Критерий подобия электрических цепей	$\Pi_9^E \rightarrow \frac{C_C}{C_G C_t}$	$\frac{C_l^3}{C_l^{7/4} C_l^{5/4}} = 1$
Критерий подобия электромагнитных полей	$\Pi_1^{EM} \rightarrow \frac{C_{\mu\epsilon} C_{\gamma\epsilon} C_l^2}{C_t}$	$\frac{C_l^{-3/2} C_l^{3/4} C_l^2}{C_l^{5/4}} = 1$
Критерий подобия электромагнитных полей	$\Pi_2^{EM} \rightarrow \frac{C_{\epsilon\epsilon}}{C_{\gamma\epsilon} C_t}$	$\frac{C_l^2}{C_l^{3/4} C_l^{5/4}} = 1$

Таблица 3

Основные критерии (числа) подобия термодинамических величин

Критерии (числа) подобия	Преобразование через масштаб
--------------------------	------------------------------

Название критерия (числа)	Обозначение в индикаторном виде	C_l
Критерий (число) Нуссельта	$Nu_l \rightarrow \frac{C_a C_l}{C_\chi}$	$\frac{C_l^{-9/4} C_l}{C_l^{-5/4}} = 1$
Критерий (число) Пекле	$Pe \rightarrow \frac{C_v C_l}{C_\alpha}$	$\frac{C_l^{-1/4} C_l}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Стэнтона	$St \rightarrow \frac{C_a}{C_{Cp} C_\rho C_v}$	$\frac{C_l^{-9/4}}{C_l^{-2} C_l^{-1/4}} = 1$
Критерий (число) Био	$Bi \rightarrow \frac{C_a C_l}{C_\chi}$	$\frac{C_l^{-9/4} C_l}{C_l^{-5/4}} = 1$
Критерий (число) Льюиса	$Le \rightarrow \frac{C_\alpha}{C_{Di}}$	$\frac{C_l^{3/4}}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Шмидта	$Sc \rightarrow \frac{C_v}{C_{Di}}$	$\frac{C_l^{3/4}}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Прандтля	$Pr \rightarrow \frac{C_v}{C_\alpha}$	$\frac{C_l^{3/4}}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Фурье	$Fo \rightarrow \frac{C_a C_t}{C_l^2}$	$\frac{C_l^{3/4} C_l^{5/4}}{C_l^2} = 1$
Критерий (число) Гей-Люссака	$Gc \rightarrow \frac{1}{C_\beta C_{\Delta T}}$	$\frac{1}{C_l^{-3/2} C_l^{3/2}} = 1$

Таблица 4

Основной критерий (число) подобия световых величин

Критерий (число) подобия		Преобразование через масштаб C_l
Название критерия (числа)	Обозначение в индикаторном виде	
Критерий подобия освещенности и светимости	$\Pi_1^{Sh} \rightarrow \frac{C_{Ev}}{C_{Mv}}$	$\frac{C_l^{-3/4}}{C_l^{-3/4}} = 1$
Критерий подобия телесного угла	$\Pi_2^{Sh} \rightarrow \frac{C_{lv}}{C_{\Phi v}}$	$\frac{C_l^{5/4}}{C_l^{5/4}} = 1$

Таблица 5

Основные критерии подобия акустических величин

Критерии (числа) подобия		Преобразование через масштаб C_l
Название критерия (числа)	Обозначение в индикаторном виде	
Критерий (число) Рейнольдса	$Re \rightarrow \frac{C_l C_v}{C_\nu}$	$\frac{C_l C_l^{-1/4}}{C_l^{3/4}} = 1$
Критерий (число) Эйлера	$Eu \rightarrow \frac{C_{\Delta p}}{C_\rho C_v^2}$	$\frac{C_l^{-1/2}}{(C_l^{-1/4})^2} = 1$
Критерий (число) Струхала	$Sh \rightarrow \frac{C_f C_l}{C_v}$	$\frac{C_l^{-5/4} C_l}{C_l^{-1/4}} = 1$
Критерий (число) Маха	$M \rightarrow \frac{C_v}{C_{ac}}$	$\frac{C_l^{-1/4}}{C_l^{-1/4}} = 1$

Таблица 6

Основные критерии подобия оптических величин

Критерий (число) подобия		Преобразование через масштаб C_l
Название критерия (числа)	Обозначение в индикаторном виде	
Критерий подобия освещенности и светимости	$\Pi_1^{Op} \rightarrow \frac{C_{Ev}}{C_{Mv}}$	$\frac{C_l^{-3/4}}{C_l^{-3/4}} = 1$
Критерий подобия телесного угла	$\Pi_2^{Op} \rightarrow \frac{C_{lv}}{C_{\Phi v}}$	$\frac{C_l^{5/4}}{C_l^{5/4}} = 1$

Таблица 7

Критерий (число) подобия производительности сил

Критерий подобия		Преобразование через масштаб C_l
Название критерия (числа)	Обозначение в индикаторном виде	
Критерий (число) производительности сил [9]	$Nd \rightarrow \frac{C_N}{C_R C_w C_v}$	$\frac{C_l^{5/4}}{C_l^{3/2} C_l^{-3/2} C_l^{5/4}} = 1$
	$Nd \rightarrow \frac{C_N}{C_R C_v}$	$\frac{C_l^{5/4}}{C_l^{3/2} C_l^{-1/4}} = 1$

В табл. 1 - 7 приводятся следующие масштабы физических величин: C_l - масштаб геометрических параметров (длина, высота, ширина и др.); C_R - масштаб сил; C_t - масштаб времени; C_m - масштаб массы; C_g - масштаб ускорения свободного падения; C_w - масштаб ускорения; C_p - масштаб плотности; C_v - масштаб скорости; $C_{\Delta p}$ - масштаб разности давления (давления); C_f - масштаб частоты колебаний; C_v - масштаб кинематической вязкости; C_v - масштаб кинематической вязкости; C_p - масштаб давления; C_σ - масштаб температуропроводности; C_μ - масштаб динамической вязкости; C_χ - масштаб теплопроводности (коэффициентов теплопроводности или удельной теплопроводности); $C_{\Delta T}$ - масштаб разности конечной и начальной температур; C_σ - масштаб поверхностного натяжения; C_{Kc} - масштаб объемных модулей упругости; C_c - масштаб удельной теплоёмкости; C_E - масштаб упругости; C_{Hb} - масштаб твердости; C_U - масштаб напряжения цепи; C_I - масштаб силы тока цепи; C_{Rc} - масштаб сопротивления цепи; C_L - масштаб индукции цепи; C_C - масштаб электрической емкости; C_G - масштаб электрической проводимости; C_w - масштаб круговой частоты; $C_{\mu e}$ - масштаб магнитной проницаемости; $C_{\nu e}$ - масштаб удельной электропроводности; $C_{\epsilon e}$ - масштаб диэлектрической проницаемости; C_a - масштаб коэффициентов теплоотдачи; C_{Cp} - масштаб удельной теплоёмкости среды; C_{Di} - масштаб коэффициентов диффузии; C_β - масштаб коэффициентов теплового расширения; C_{Ev} - масштаб освещённости; C_{Mv} - масштаб светимости; C_{lv} - масштаб сила света; $C_{\Phi v}$ - масштаб светового потока; C_{ac} - масштаб скорости звука; C_N - масштаб мощности располагаемой тяги рыболовного судна.

Критерий Фруда F_r с учетом масштаба ускорения свободного падения C_g влияет на динамические процессы тралового комплекса: спуск и выборку трала. Так, как на поверхности Земли соблюдается условие $C_g=1$, и обеспечить $C_g=C_l^{3/2}$ не представляется возможным, то, при условии автомодельности по числу Фруда F_r [1], возможно данным критерием пренебречь.

На основании данных табл. 1 - 7 разработана компьютерная программа для ЭВМ «Критерии мультифизического подобия процессов рыболовства», которая предназначена для анализа выполнения критериев подобия, а также анализа и минимизации величины масштабного эффекта при моделировании тралового комплекса, зависимостей между критериями подобия в мультифизической области (механическими, гидродинамическими, грунтодинамическими, трибологическими, электродинамическими, термодинамическими, световыми, акустическими, оптическими, формопределяющими, временными) применительно к процессам рыболовства, в том числе визуального в трехмерном представлении. Данная программа позволяет рассчитывать критерии подобия для конкретного масштаба линейных размеров C_l , который задается исходя из линейных размеров экспериментальной установки или механизма и др.

При визуализации используется цилиндрическая система координат.

3. Результаты

На рис. 2 изображена форма для ввода входных параметров и отображения диапазонов расчетных масштабов подобия мультифизических процессов рыболовства, разбитых на группы по физической принадлежности, протекающих в траловых комплексах. Входными параметрами являются диапазон значений C_l и степень дискретизации результата при трехмерной визуализации зависимостей расчетных критериев подобия в индикаторном виде от C_l в цилиндрической системе координат.

Пользовательский интерфейс реализует возможность исключения масштабирования любого (или нескольких) параметра тралового комплекса при расчете критериев подобия (масштаб подобия считается равным 1, устанавливается в правом столбце на рис. 2), тем самым обеспечивая возможность анализа погрешности физического моделирования при невыполнении масштабирования выбранных мультифизических параметров.

На рис. 3 изображена форма отображения результатов расчета в виде диапазонов значений критериев подобия, разбитых на группы по физической принадлежности, в индикаторном виде в зависимости от диапазона значений C_l с учетом условий, накладываемых на масштабы подобия (их привязки к C_l , задаваемой пользователем методом включения/исключения масштабирования).

Cl	1,00000	2,00000	Дискретизация	100	0	<input checked="" type="checkbox"/> Оси	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> -
<input type="checkbox"/> Относительный <input type="checkbox"/> Нормализация								
Механические масштабы подобия								
Гидродинамические масштабы подобия								
Параметр	М	От	До	1				
Площадь	CF	1.00000	4.00000	<input type="checkbox"/>				
Объем	CV	1.00000	8.00000	<input type="checkbox"/>				
Момент инерции	CI	1.00000	16.00000	<input type="checkbox"/>				
Масса	CM	1.00000	8.00000	<input type="checkbox"/>				
Время	CT	1.00000	2.37841	<input type="checkbox"/>				
Скорость	CV	1.00000	0.84090	<input type="checkbox"/>				
Сила	CR	1.00000	2.82843	<input type="checkbox"/>				
Ускорение	CW	1.00000	0.35355	<input type="checkbox"/>				
Объемный вес	CY	1.00000	0.35355	<input type="checkbox"/>				
Момент (вращательный)	CM6	1.00000	5.65685	<input type="checkbox"/>				
Плотность воды	CP	1.00000	1.00000	<input type="checkbox"/>				
Динамическая вязкость воды	CP1	1.00000	1.68179	<input checked="" type="checkbox"/>				
Кинематическая вязкость воды	CV	1.00000	1.68179	<input checked="" type="checkbox"/>				
Давление	CP	1.00000	0.70711	<input type="checkbox"/>				
Частота колебаний	CI	1.00000	0.42045	<input type="checkbox"/>				
Потенциальная энергия	CU1	1.00000	5.65685	<input type="checkbox"/>				
Кинетическая энергия	CT1	1.00000	5.65685	<input type="checkbox"/>				
Нормальная нагрузка	CG1	1.00000	0.70711	<input type="checkbox"/>				
Угол	CA	1.00000	1.00000	<input type="checkbox"/>				
Скользкость	CO	1.00000	1.00000	<input type="checkbox"/>				
Коэффициент сопротивления	CK	1.00000	1.00000	<input type="checkbox"/>				
Коэффициент трения	CD	1.00000	1.00000	<input type="checkbox"/>				
Относительное удлинение	CE	1.00000	1.00000	<input type="checkbox"/>				
Грунтодинамические масштабы подобия								
Трибологические масштабы подобия								
Электродинамические масштабы подобия								
Термодинамические масштабы подобия								
Световые масштабы подобия								
Акустические масштабы подобия								
Оптические масштабы подобия								

Рис. 2. Входные параметры и группы масштабов подобия программы для ЭВМ

Механические критерии подобия в индикаторном виде				
Гидродинамические критерии подобия в индикаторном виде				
Критерий	П	От	До	V
Ройнольдса	Ro	1.00000	1.68179	<input checked="" type="checkbox"/>
Рошко	Rk	1.00000	1.68179	<input checked="" type="checkbox"/>
Прандтля	Pr	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
Стокса	Sk	1.00000	1.68179	<input checked="" type="checkbox"/>
Кирпичева	Ki	1.00000	2.82843	<input checked="" type="checkbox"/>
Экмана	EK	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
Капиллярности	Cr	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
Грунтодинамические критерии подобия в индикаторном виде				
Критерий	П	От	До	V
Лапласа	La	1.00000	2.82843	<input checked="" type="checkbox"/>
Вебера	We	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Коши	Ca	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Трибологические критерии подобия в индикаторном виде				
Критерий	П	От	До	V
Упругости	PE1	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Твердости	PNB	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Трения (износа)	PWe1	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
	PWe2	1.00000	1.68179	<input checked="" type="checkbox"/>
Электродинамические критерии подобия в индикаторном виде				
Термодинамические критерии подобия в индикаторном виде				
Критерий	П	От	До	V
Бринкмана	Bg	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
Экхарта	Ec	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Нуссельта	Nu1	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Пекле	Pe	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Стантона	St	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Бю	Bi	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Льюиса	Le	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Шмидта	Sc	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
Прандтля	Pr	1.00000	0.59460	<input checked="" type="checkbox"/>
Фурье	Fo	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Гей-Люссака	Gc	1.00000	1.00000	<input checked="" type="checkbox"/>
Световые критерии подобия в индикаторном виде				
Акустические критерии подобия в индикаторном виде				
Оптические критерии подобия в индикаторном виде				
Критерий подобия производительности сил в индикаторном виде				

Рис. 3. Группы расчетных критериев подобия программы для ЭВМ

На рис. 4 приведен пространственный график зависимости выбранных пользователем (правый столбец «V» на рис. 3) расчетных критериев подобия

в индикаторном виде от C_i . По оси цилиндра отложено значение масштаба C_i . Полярному углу сопоставляется расчетный критерий подобия в индикаторном виде, полярному радиусу - значение расчетного критерия подобия.

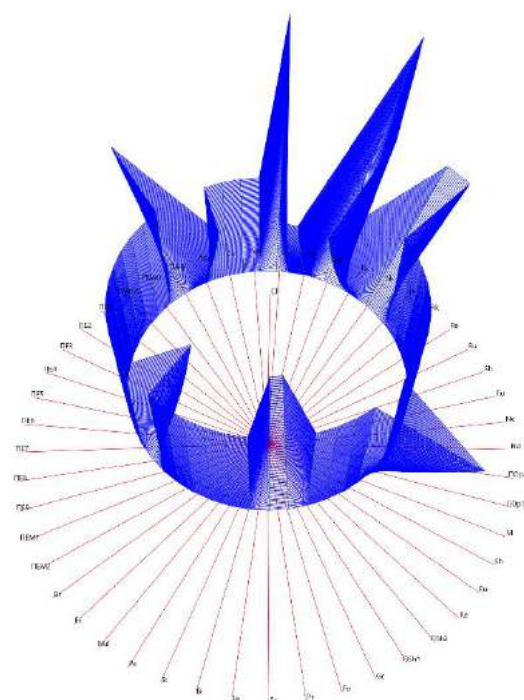


Рис. 4. Пространственный график зависимости расчетных критериев подобия в индикаторном виде от C_i

Расчетные значения всех критериев подобия, соответствующие одному значению C_i , с заданной степенью дискретизации соединяются замкнутой линией.

Выводы

В статье приводятся критерии мультифизического подобия траловых комплексов (донного и разноглубинного), предложен пространственный метод их визуализации при помощи разработанной авторами программы для ЭВМ «Критерии мультифизического подобия процессов рыболовства» с целью упрощения анализа степени адекватности той или иной физической модели тралового комплекса в зависимости от степени соблюдения масштабов подобия тех или иных (выбирается пользователем) мультифизических параметров тралового комплекса.

Степень адекватности физической модели можно оценивать как в числовом виде по дисперсии значений критериев подобия в индикаторном виде при их математическом ожидании, равном 1 и различных диапазонах значений C_i , (см. рис. 3), так и по визуальному пространственному представлению критериев подобия по степени отклонения поверхности, образованной множеством замкнутых линий (см. рис. 4) от боковой поверхности цилиндра.

Результаты исследования планируется применять для дальнейшей разработки методов управления технической системой судно-трал.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

Литература

1. Фридман, А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. - М: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 327 с.
2. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике. - М. - Наука, 1977. - 440 с.
3. Недоступ А.А. Физическое моделирование орудий и процессов рыболовства: Монография. Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2012. - 375 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2020664633 Российская Федерация. Масштабы мультифизического подобия процессов рыболовства / А.А. Недоступ, А.О. Ражев ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». - № 2020663374 ; заявл. 03.11.2020 ; опубл. 16.11.2020. – 1 с.
5. Волкогон В.А., Недоступ А.А., Ражев А.О., Кострикова Н.А., Поляков Р.К., Кузин В.И. Обоснование создания тренажерного комплекса по проектированию и моделированию траловых систем. Морские интеллектуальные технологии. №4(38) Т.2. 2017. - С. 177-185.
6. Гуревич В., Волман Г. Теория размерности. - ИЛ. - 1948. – 231 с.
7. Эпштейн, Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. - Л.: Судостроение, 1970. - 208 с.
8. Недоступ А.А., Ражев А.О. Создание правил мультифизического подобия тралового комплекса. Морские интеллектуальные технологии. №1 - Том 1 - 2021. - С. 132-137.
9. Недоступ А.А., Ражев А.О. Производительность сил траловой системы: Постановка задачи. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. №2. - 2021. - С. 55-65.

References

1. Fridman, A.L. *Teoriya i proektirovanie orudij promyshlennogo rybolovstva* [Theory and design of industrial fishing gears]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981, 327 p.
2. Sedov, L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimension methods in mechanics]. Moscow, Nauka, 1977, 440 p.
3. Nedostup, A.A. *Fizicheskoe modelirovanie orudij i processov rybolovstva* [Physical modeling of gears and processes of fishery]. Monography, Kaliningrad, izd. FGBOU VO «KGTU», 2012, 375 p.
4. Nedostup, A.A., Razhev, A.O. Certificate of state registration of computer programs No. 2020664633, Russian Federation. *Masshtaby mul'tifizicheskogo podobiya processov rybolovstva* [The scale of the multiphysical similarity of fishing processes]. *Zayavitel' i pravoobladatel' FGBOU VO «KGTU»*, No. 2020663374, *zayavl.* 03.11.2020, *opubl.* 16.11.2020, 1 p.
5. Volkogon V.A., Nedostup A.A., Razhev A.O., Kostrikova N.A., Polyakov R.K., Kuzin V.I. *Obosnovanie sozdaniya trenazhernogo kompleksa po proektirovaniyu i modelirovaniyu tralovoykh sistem* [Justification of the creation of a training complex for the design and modeling of trawl systems]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, No. 4(38), V. 2, 2017, pp. 177-185.
6. Gurevich V., Volmen G. *Teoriya razmernosti* [Dimension theory]. IL, 1948, 231 p.
7. Epshtejn, L.A. *Metody teorii razmernostej i podobiya v zadachah gidromekhaniki sudov* [Methods of the theory of dimensions and similarity in problems of ship hydromechanics]. - L.: Sudostroenie, 1970, 208 p.
8. Nedostup A.A., Razhev A.O. *Sozdanie pravil mul'tifizicheskogo podobiya tralovogo kompleksa* [Creating rules for the multiphysical similarity of a trawl complex]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, No. 1, V. 1, 2021, pp. 132-137.
9. Nedostup A.A., Razhev A.O. *Proizvoditel'nost' sil tralovoj sistemy: Postanovka zadachi* [Performance of the trawl system forces: Problem statement]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo*, No. 2, 2021, pp. 55-65.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Алексеевич Недоступ, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Ражев, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: progacpp@live.ru

Alexander A. Nedostup, Ph. D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Aleksey O. Razhev, Ph. D. (Eng), junior research assistant, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: progacpp@live.ru

Поступила в редакцию: 29.07.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 62-529.4:519.87

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.058>

Математическое моделирование в процессе проектирования пусковых систем для морских робототехнических комплексов

Р.В. Красильников¹, e-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru, С.С. Жарова², e-mail: sszharova@mail.ru¹Концерн «МПО – Гидроприбор», ²БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация. Одним из востребованных направлений в современном развитии передовых в техническом плане стран является создание робототехнических систем и комплексов разного базирования. Одним из приоритетных направлений использования телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов остаются поисковые работы, связанные с обнаружением и обследованием подводных объектов. Актуальность данных работ определяется расширением областей применения аппаратов, в том числе в Арктическом регионе России в рамках работ по освоению континентального шельфа. В статье раскрыт общий методологический подход к проектированию пусковых систем, согласованный с требованиями нормативных документов, определяющих порядок разработки новых образцов техники. Показана роль математического моделирования в рамках процесса создания пусковых систем. В качестве основы методического подхода к математическому моделированию предложен единый математический аппарат обоснования проектных параметров пусковых систем. Показаны рациональные по времени и трудозатратам подходы к оценке адекватности математических моделей процессов пуска, базирующиеся на сравнении экспериментальных и расчетных величин перемещения и ускорений движущихся элементов.

Ключевые слова: математическое моделирование, пусковая система, метод пуска, необитаемый подводный аппарат, экспериментальный стенд, видеосъемка процесса пуска, адекватность модели.

Mathematical modeling in the process of designing launch systems for marine robotic systems

Roman V. Krasilnikov¹, e-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru, Svetlana S. Zharova², e-mail: sszharova@mail.ru¹Concern «SUW – Gidropribor», Saint Petersburg, Russia, ²BSTU «VOENMEH» n.a. D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

Abstract. One of the demanded directions in the modern development of technically advanced countries is the creation of robotic systems and complexes of various bases. One of the priority areas for the use of remotely controlled unmanned underwater vehicles remains search work related to the detection and examination of underwater objects. The relevance of these works is determined by the expansion of the areas of application of the vehicles, including in the Arctic region of Russia as part of the work on the development of the continental shelf. The article discloses a general methodological approach to the design of launch systems, consistent with the requirements of regulatory documents that determine the procedure for the development of new models of equipment. The role of mathematical modeling in the process of creating launch systems is shown. A unified mathematical apparatus for substantiating the design parameters of launch systems is proposed as the basis for a methodological approach to mathematical modeling. The rational in terms of time and labor costs approaches to assessing the adequacy of mathematical models of start-up processes, based on a comparison of experimental and calculated values of displacement and acceleration of moving elements, are shown.

Keywords: mathematical modeling, launch system, launch method, unmanned underwater vehicle, experimental stand, video recording of the launch process, model adequacy.

Введение

Одним из востребованных направлений в современном развитии передовых в техническом плане стран является создание робототехнических систем и комплексов разного базирования. Бесспорным мировым лидером и инициатором крупных программ в этой области являются США (доля работ составляет 65-75% общего мирового объема) [1]. Также активные работы в данном направлении проводят такие страны как Германия, Израиль, Италия, Франция, Великобритания и ряд других.

Если говорить о морских робототехнических комплексах (МРТК), то, согласно данным аналитики [2], в мире насчитывается более 350 крупных компаний, являющихся их разработчиками и производителями. В России данное направление техники так же достаточно динамично развивается.

Согласно действующему ГОСТ Р 56960-2016 «Аппараты необитаемые подводные. Классификация» [3], необитаемые подводные

аппараты (НПА) могут быть автономными (АНПА) или телеуправляемыми (ТНПА), при этом к телеуправляемым аппаратам также относятся и буксируемые НПА.

Работы по созданию ТНПА начались в НИИ-400 (с 1966 г. – НИИ «Гидроприбор») приблизительно в конце 1950-х гг. Разработка поисковых систем с использованием гидролокаторов была начата в «Гидроприборе» в 1960 году, а в 1973 году был полностью сдан заказчику первый комплекс КИУ-1, который мог использоваться как автоматизированная система при поиске любых подводных объектов [4].

С того времени и до сих пор приоритетным направлением использования ТНПА остаются поисково-обследовательские работы, связанные с обнаружением и обследованием подводных объектов. Актуальность данных работ определяется расширением областей применения аппаратов, в том числе в Арктическом регионе России в рамках работ по освоению континентального шельфа. При этом необходимо обеспечивать размещение НПА на

разного типа платформах, в том числе, стационарных.

В качестве примера подобной опускаемой платформы, на которой размещается ТНПА, можно привести техническое решение по Патенту РФ на изобретение № 2 746 060 «Быстроразвертываемый комплекс поиска затонувших объектов» [5]. Приведенный пример предполагает наличие специально заглубляемой с борта судна обеспечения платформы, на которой располагается один или несколько ТНПА. При этом одной из задач, которые необходимо решить в процессе проектирования такого комплекса, является безопасное отделение ТНПА от платформы, обеспечиваемое с помощью пусковой системы.

В рамках данной статьи будет рассмотрен общий методологический подход к проектированию подобных пусковых систем для МРТК, а также показана роль математического моделирования в рамках процесса их создания.

Процесс проектирования пусковых систем традиционно основывается на совместном применении взаимодополняющих методов. Научно обоснованное создание пусковых систем для морских робототехнических комплексов не может быть в полной мере реализовано без построения понятной структуры исследований, с одной стороны, обеспечивающей выбор и реализацию технических решений пусковых систем, а с другой – не противоречащей устоявшимся подходам, в том числе регламентируемым системой государственных стандартов.

1. Общий методологический подход к проектированию пусковых систем

Процесс создания важных для государства объектов, в том числе технических объектов, относящихся к категории робототехники, регламентируется нормативными документами – государственными (ГОСТ) и отраслевыми стандартами (ОСТ), техническими условиями (ТУ), общими техническими требованиями (ОТТ) [6].

Создание любого сложного технического устройства – многостадийный итерационный процесс, имеющий ряд этапов [7] (рисунок 1).

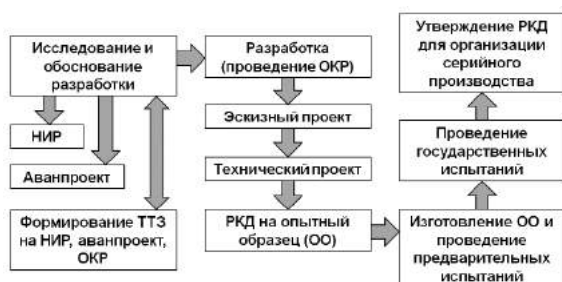


Рис. 1 – Виды работ, выполняемые в рамках создания образца

Соответствие этапов создания технических объектов, регламентируемых системой ГОСТ и рассматриваемых этапов проектирования пусковых систем проиллюстрировано рисунком 2.



Рис. 2 – Этапы проектирования пусковой системы

Рассмотрим указанные этапы и их содержание более подробно.

Поисковый этап

Данный этап является одним из наиболее важных этапов проектирования. На этапе осуществляется поиск конструктивно-технологического решения, удовлетворяющего целому ряду требований, предъявляемых к разрабатываемой системе.

Задачи, решаемые в рамках поискового этапа:

1. выявление условий и факторов, влияющих на функциональное решение, в том числе:
 - условий и вариантов применения пусковой системы;
 - ограничений (максимальные допустимые ускорения, требуемый диапазон глубин применения и т.п.);
 - вопросов интеграции разрабатываемой пусковой системы с системами носителя (электрической, информационной, воздушной и т.п.);
 - вопросов эксплуатации пусковой системы, ее размещения на носителе, хранения на берегу, погрузки-выгрузки и т.п.

2. патентные исследования и защита интеллектуальной собственности (составление и отправка заявки на получение охранного документа на разработанную схему) [8].

Баллистическое проектирование

Следующим шагом при проектировании пусковой системы является ее баллистическое проектирование [9], которое включает в себя несколько этапов, перечисленных ниже.

Этап 1. Построение расчетной схемы

Данный этап предполагает проведение следующих работ:

- выбор или получение исходных данных для проектирования, уточнение и обработка данных о задачах, решаемых изделием, в том числе размеров изделия, его массы, ограничений по массогабаритным характеристикам пусковой системы и т.п.;
- выбор и введение обозначений расчетных величин, определение начальных условий функционирования системы, обоснование расчетного вида изделия;
- обоснование допущений при составлении математической модели процесса работы системы, выбор физических законов, составляющих основу расчета;
- расчетная оценка определяющих конструктивных размеров пусковой системы и начальных значений определяющих ее работу параметров.

Этап 2. Разработка математической модели и проведение проверочных расчетов

На данном этапе производится расчетная проверка корректности выбранных в ходе первого этапа конструктивных размеров комплекса и

задаваемых величин. По результатам математического моделирования производится необходимая корректировка указанных значений.

Этап 3. Проведение параметрических исследований

В рамках этого этапа проектирования производится определение влияния на процесс работы пусковой системы разнообразных факторов. Например, для гидропоршневой пусковой системы такими факторами могут являться начальные температура и давление сжатого воздуха в баллоне, внутренний объем баллона, начальный объем расширительной полости, масса изделия, площадь сечения обтюрации и т.п.

Этап 4. Оптимизация параметров управляющего устройства пусковой системы с целью достижения требуемого значения критерия оптимизации

В рамках третьего этапа производится не только оценка влияния ряда факторов на работу пусковой системы, но и осуществляется выбор наиболее существенно влияющих на рассматриваемый процесс факторов. На четвертом этапе проектирования с применением методики оптимизации осуществляется целенаправленный выбор таких значений наиболее влияющих факторов, при которых процесс функционирования системы удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям во всем диапазоне изменения внешних факторов, влияющих на него.

Этап 5. Выработка рекомендаций для проектирования

В рамках этого этапа производится оценка технологичности разработанной конструкции, выбор конструкционных материалов и т.п.

Техническое проектирование

На данном этапе формируется окончательный облик системы, проводятся необходимые расчеты, обосновывающие параметры элементов конструкций. Результатом является технический проект, представляемый Заказчику.

Принятие решений

Заключительным этапом перед разработкой РКД является этап, на котором производится сравнение разных технических проектов, реализующих альтернативные технические решения по размещению образцов МПРО на носителе или стационарном объекте.

В рамках данного этапа необходимо провести сравнение предлагаемых технических вариантов и принять решение о дальнейшей разработке.

Наиболее важными этапами, требующими разработки новых теоретических и практических инструментов, являются поисковый этап, этап баллистического проектирования и этап принятия решений. На этапе поиска необходимо иметь четкие критерии, позволяющие выделить приоритетные технические решения из множества возможных, а на этапе принятия решений – критерии для выбора наиболее лучшего варианта пусковой системы.

В рамках данной статьи представляет интерес более подробно рассмотреть проведение баллистического проектирования, которое так же требует выработки единого методического подхода [10].

2. Особенности математического моделирования подводных пусковых систем

Традиционно вопросы движения выстреливаемых или бросаемых в пространстве тел рассматриваются в баллистике.

Различают внутреннюю баллистику, исследующую движение снаряда в канале орудия, изделия в пусковой трубе и т.п. в процессе пуска, и внешнюю, которая исследует движение отделяемого тела после прекращения контакта с направляющими элементами и его движения по определенной траектории.

Особенность большей части подводных изделий заключается в наличии собственного двигательного движительного комплекса (ДДК), отвечающего за процесс перемещения по траектории после пуска [11]. Это приводит к тому, что подавляющее число задач, связанных с моделированием процесса пуска изделий, относится к задачам внутренней баллистики. Как уже отмечалось, для проектантов пусковых систем основным требованием является безаварийное отделение изделия от носителя, что подразумевает выполнение двух условий:

1) разгон изделия с нулевой скорости (статического положения) до заданной выходной скорости на длине пусковой установки (до момента потери контакта с ее элементами). Достижение заданного значения выходной скорости подразумевает, что изделие сможет безопасно разойтись с частями носителя и задействовать свой ДДК для реализации дальнейшего движения;

2) максимально допустимые перегрузки (ускорения) в процессе разгона изделия. Непревышение заданной величины ускорения (разности положительных и отрицательных ускорений) гарантирует, что составные части изделия (аппаратная часть, источник энергии, гидроакустический комплекс и т.п.) останутся работоспособными.

Таким образом, основными параметрами, определяющими успешность пуска, являются скорость и ускорение изделия. Именно для получения данных о скорости изделия строится большинство математических моделей.

В подавляющем большинстве моделей рассматривается одномерное движение изделия вдоль элементов пусковой установки (ПУ). Часто это направление движения совпадает с продольной осью изделия (исключение – всплытие или погружение изделия под действием положительной или отрицательной плавучести). Все силы, действующие на изделие, проецируются на ось абсцисс (X), вдоль положительного направления которой осуществляется пуск. Характерный пример таких сил – гидродинамические силы от набегающего потока воды при траверсном пуске (перпендикулярном движению носителя). Их воздействие приводит к возникновению реакций опоры в местах контакта элементов изделия и направляющих ПУ, которые преобразуются в соответствующие силы трения [12].

С учетом вышесказанного, в качестве основы методического подхода к математическому моделированию предлагается следующий единый математический аппарат обоснования проектных параметров пусковых систем (рисунок 3).



Рис. 3 – Общая схема математической модели в составе методик проектирования

На рисунке 3 приведен пример реализации подхода к математическому моделированию в процессе проектирования пусковой системы, имеющей механический толкающий элемент, приводимый в движение за счет давления.

Как можно видеть, в блоках исходных данных по изделию и по носителю задаются требуемые исходные параметры согласно принятой расчетной схеме.

В блоке выбора проектных параметров ПУ производится базовая оценка рабочего хода толкающего элемента, его наружного диаметра, начального объема расширительной полости и объема баллона с проверкой выбранного значения.

В блоке расчета внутренней баллистики производятся поблочные расчеты параметров процессов в газовых полостях пусковой установки, в полости пусковой трубы, заполненной жидкостью, а также процессов перемещения и торможения толкающего элемента, изделия и массы воды, вовлекаемой в движение.

Блок оптимизации параметров пусковой установки предполагает целенаправленный выбор таких значений наиболее влияющих факторов, при которых процесс функционирования установки удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям во всем диапазоне изменения влияющих на него внешних факторов.

Блок графического отображения результатов расчетов позволяет наглядно представить моделируемые процессы, обеспечить их анализ.

Блок принятия решений является результирующим, определяющим возможность завершения моделирования по достижении приемлемых значений критериев (удовлетворение требованиям по минимальной выходной скорости и максимально допустимым ускорениям, а также дисперсии выходной скорости в диапазоне глубин пуска) или необходимость изменения исходных данных для повторного моделирования.

3. Реализация математической модели в расчетном пакете

Наиболее удобным инструментом для проведения баллистического проектирования являются прикладные расчетные пакеты, позволяющие реализовать численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс пуска. На рисунке 4 приведен пример такой реализации в расчетном пакете Matlab Simulink.

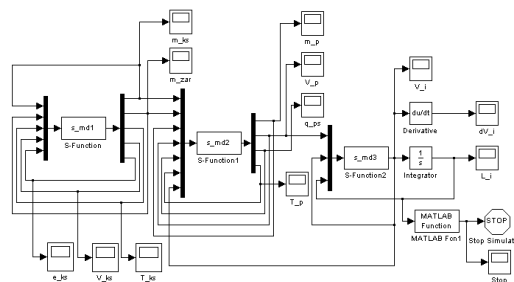


Рис. 4 – Структура математической модели

Как видно из рисунка 4, основные соотношения, описывающие процессы в выбранных для моделирования полостях, и процессы, сопровождающие перемещение изделия и толкающего элемента, сведены в три S-функции: s_md1 (источник давления), s_md2 (расширительная полость) и s_md3 (перемещение толкающего элемента и изделия). Количество выходов каждой функции определяется количеством дифференциальных уравнений. Соответственно на входы функций поступают значения переменных, полученных в результате численного интегрирования дифференциальных уравнений. Добавив к схеме дополнительные блоки интегрирования и дифференцирования, можно получать текущие значения данных параметров применительно к определенной переменной. Это показано в правой части рисунка: дополнительно интегрируя получаемое значение скорости изделия ($v_{из}$), мы имеем значение перемещения изделия ($L_{из}$), а проводя дифференцирование, получаем ускорение изделия ($dV_{из}$). Очевидно, что стоп-функция срабатывает по достижении определенного значения перемещения изделия, задаваемого исходя из его длины.

Любой из получаемых в процессе расчетов параметров можно отобразить графически в виде зависимости от времени. Для этого на схеме размещены блоки Scope, «подключенные» к соответствующим связям.

4. Оценка адекватности математической модели процесса пуска

Центральным в теории математического моделирования является понятие адекватности [10]. Адекватность математической модели – это соответствие результатов вычислительного эксперимента поведению реального объекта.

Для выявления этого соответствия для механических систем и процессов, характеризующихся измеримыми величинами – параметрами, необходимо провести сравнение параметров модели и оригинала в одних и тех же условиях. Очевидно, что сравнивать следует лишь соответствующие друг другу параметры между собой и только в той области функционирования объекта, в которой предполагается его исследовать.

Одним из наиболее удобных для сравнения параметров является перемещение изделия или толкающего элемента. Существует ряд методов измерений, позволяющих оценить перемещение в процессе пуска: механический (например, с размоткой тросика, прикрепленного к толкающему

элементу), визуальный (например, с применением скоростной видеосъемки) и другие.

В качестве примера оценки адекватности можно привести сравнение графических зависимостей перемещения толкающего элемента от времени, полученных в ходе проведения экспериментов (оценка перемещения производилась по результатам анализа видеосъемки процесса пуска) и в результате математического моделирования (рисунок 5).

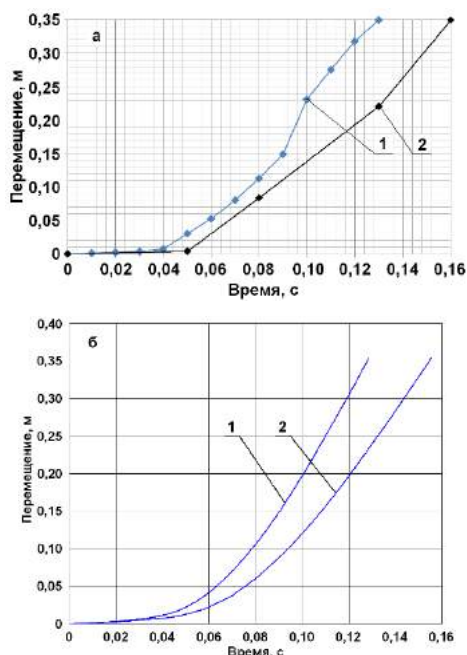


Рис.5 – Перемещение толкателя при разных значениях плотности окружающей среды: а – экспериментальные данные; б – расчетные данные; 1 – перемещение в воздушной среде; 2 – перемещение в водной среде

Еще один из возможных методов фиксации перемещения изделия или толкающего элемента основан на применении акселерометров, жестко закрепляемых на соответствующих подвижных частях. Пример показаний датчика ускорений, полученных в ходе эксперимента, приведен на рисунке 6.

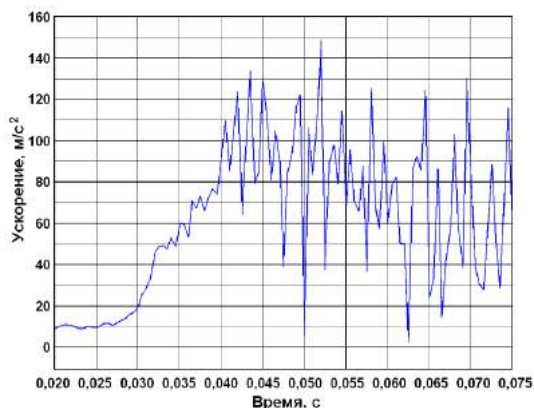


Рис.6 – Показания датчика ускорений, размещенного во внутренней полости запускаемого макета изделия

Естественно, полученные в результате измерений данные нуждаются в обработке. Один из удобных методов обработки, реализованный с помощью программы Excel, проиллюстрирован на рисунке 7.

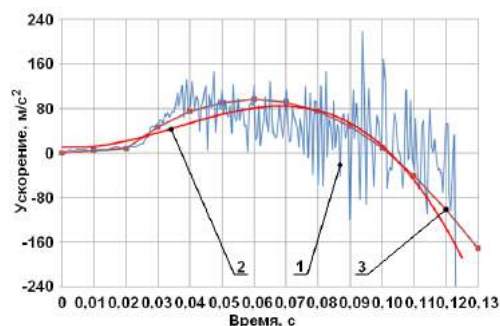


Рис. 7 – Пример полученных экспериментальных зависимостей динамики движения толкателя

На рисунке 7 обозначены: 1 – реальная зависимость ускорения толкающего элемента, полученная с помощью измерительно-регистрирующего комплекса; 2 – аппроксимирующая кривая для данных 1, построенная в программе Excel; 3 – зависимость ускорения толкателя от времени, полученная путем анализа скоростной видеосъемки процесса отделения.

Применение указанных подходов к оценке адекватности математических моделей процессов пуска позволяет обеспечить удобство исследователя и скорость получения результатов.

Закключение

1. Развитие робототехнических комплексов в интересах освоения Арктического шельфа требует создания новых, более эффективных технических решений, позволяющих повысить производительность проводимых работ. Одним из таких решений является создание опускных платформ с базируемыми на них аппаратами. Безопасное отделение аппаратов от таких платформ, в свою очередь, требует создания пусковых систем.

2. В статье раскрыт общий методологический подход к проектированию пусковых систем, согласованный с требованиями нормативных документов, определяющих порядок разработки новых образцов техники.

3. Выделены основные особенности математического моделирования процесса срабатывания пусковых систем, показан методический подход к реализации математического моделирования в рамках проектирования пусковых систем.

4. Показаны рациональные по времени и трудозатратам подходы к оценке адекватности математических моделей процессов пуска, базирующиеся на сравнении экспериментальных и расчетных величин перемещения и ускорений движущихся элементов.

Таким образом, приведенная в статье методологическая база для проведения математического моделирования в процессе проектирования пусковых систем позволяет обеспечить повышение эффективности разрабатываемых робототехнических комплексов.

Литература

1. Лопота, А.В. Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения [Текст] / А.В. Лопота, А.Б. Николаев. – Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК, 2016. – 48 с.
2. Текст : электронный. – 2021. – URL: <http://roboticsdatabase.auvsi.org/> (дата обращения: 12.03.2021).
3. ГОСТ Р 56960-2016 «Аппараты необитаемые подводные. Классификация».
4. Красильников, Р.В. История развития необитаемых подводных аппаратов разработки ГНЦ «Гидроприбор» [Текст] / Р.В. Красильников, М.З. Нисневич // Научно-технический сборник «Подводное морское оружие». Вып. 4(47) – СПб.: АО «Концерн «Морское подводное оружие – «Гидроприбор», 2019, с. 27-35.
5. Пат. 2746060 Российская Федерация, МПК В63С 11/48, В63С 7/26. Быстроразвертываемый комплекс поиска затонувших объектов [Текст] / О.И. Ефимов, В.С. Назаренко, А.В. Шалдыбин, А.В. Карпов, О.В. Гудкова, Р.В. Красильников, М.А. Медяников. № 2020108564; заявл. 28.02.2020; опубл. 06.04.2021, Бюл. № 10.
6. Тарасенко, С.А. Формализованная методология исследования специальной техники [Текст] / С.А. Тарасенко. – М.: АО «Красная Звезда», 2017. – 368 с. – ISBN 978-5-88727-132-3.
7. Захаров, И.Г. Обоснование выбора. Теория практики [Текст] / И.Г. Захаров. – СПб.: Судостроение, 2006. – 528 с.
8. Красильников, Р.В. Инновации и защита интеллектуальной собственности в подводной технике [Текст] / Р.В. Красильников. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2011. – 225 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-85546-652-2.
9. Чуев, Ю.В. Проектирование ствольных комплексов [Текст] / Ю.В. Чуев. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
10. Грехов, А.А. Моделирование систем [Текст] / А.А. Грехов, В.Н. Наумов, Ю.В. Демьшев. – Петродворец: Изд-во ВМИРЭ им. А.С. Попова, 2009. – 591 с.
11. Красильников, А.В. Проектирование и испытания малогабаритных подводных пусковых устройств: учеб. пособие [Текст] / А.В. Красильников, Р.В. Красильников, В.Л. Мартынов, А.П. Маштаков; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2017. – 126 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-906920-67-6.
12. Жарова, С.С. Математическое моделирование процессов пуска подводных изделий: учеб. пособие [Текст] / С.С. Жарова, Р.В. Красильников, В.Л. Мартынов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 45 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-907324-00-8.

References

1. Lopota, A.V. Morskije robototekhnicheskie komplekсы voennogo i special'nogo naznacheniya [Marine robotic complexes for military and special purposes] / A.V. Lopota, A.B. Nikolaev. – St. Petersburg: TsNII RTK, 2016. – 48 p.
2. Text: electronic. – 2021. – URL: <http://roboticsdatabase.auvsi.org/> (date accessed: 12.03.2021).
3. GOST R 56960-2016 "Apparaty neobitaemye podvodnyye. Klassifikaciya" [Unmanned underwater vehicles. Classification].
4. Krasilnikov, R.V. Istoriya razvitiya neobitaemyh podvodnyh apparatov razrabotki GNC «Gidropribor» [The history of the development of uninhabited underwater vehicles developed by the State Scientific Center "Gidropribor"] / R.V. Krasilnikov, M.Z. Nisnevich // Scientific and technical collection Underwater Sea Weapons. Issue 4 (47) – SPb. : JSC "Concern" SUW – Hidropribor", 2019, p. 27-35.
5. Pat. 2746060 Russian Federation, IPC B63C 11/48, B63C 7/26. Bystrorazvertyvaemyj kompleks poiska zatonusih ob"ektov [Rapidly deployable complex for the search for sunken objects] / O.I. Efimov, V.S. Nazarenko, A.V. Shaldybin, A.V. Karpov, O. V. Gudkova, R.V. Krasilnikov, M.A. Medyannikov. No. 2020108564; declared 02/28/2020; publ. 04/06/2021, Bul. No. 10.
6. Tarasenko, S.A. Formalizovannaya metodologiya issledovaniya special'noj tekhniki [Formalized methodology for the study of special equipment] / S.A. Tarasenko. – M.: AO Krasnaya Zvezda, 2017. – 368 p. – ISBN 978-5-88727-132-3.
7. Zakharov, I.G. Obosnovanie vybora. Teoriya praktiki [Rationale for the choice. The theory of practice] / I.G. Zakharov. – SPb. : Shipbuilding, 2006. – 528 p.
8. Krasilnikov, R.V. Innovacii i zashchita intellektual'noj sobstvennosti v podvodnoj tekhnike [Innovations and protection of intellectual property in underwater technology] / R.V. Krasilnikov. – SPb. : Balt. state tech. un-t, 2011. – 225 p. – 300 copies. – ISBN 978-5-85546-652-2.
9. Chuev, Yu.V. Proektirovanie stvol'nyh komplekсов [Shaft complexes design] / Yu.V. Chuev. - M. : Mechanical Engineering, 1976. – 216 p.
10. Grekhov, A.A. Modelirovanie sistem [Modeling of systems] / A.A. Grekhov, V.N. Naumov, Yu.V. Demyshev. – Petrodvorets: Publishing house of VMRE them. A.S. Popova, 2009. – 591 p.
11. Krasilnikov, A.V. Proektirovanie i ispytaniya malogabaritnyh podvodnyh puskovyh ustrojstv: ucheb. posobie [Design and testing of small-sized underwater launching devices] / A.V. Krasilnikov, R.V. Krasilnikov, V.L. Martynov, A.P. Mashtakov; Balt. state tech. un-t. – SPb., 2017. – 126 p. - 100 copies. – ISBN 978-5-906920-67-6.
12. Zharova, S.S. Matematicheskoe modelirovanie processov puska podvodnyh izdelij: ucheb. posobie [Mathematical modeling of the processes of launching underwater products] / S.S. Zharova, R.V. Krasilnikov, V.L. Martynov; Balt. state tech. un-t. – SPb., 2020. – 45 p. – 100 copies. – ISBN 978-5-907324-00-8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Роман Валентинович Красильников, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник, АО «Концерн «МПО – Гидроприбор», 194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24, e-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru

Светлана Сергеевна Жарова, преподаватель кафедры «Информационные системы и программная инженерия», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: sszharova@mail.ru

Roman V. Krasilnikov, Ph.D. (Eng), assistant professor, Chief Researcher, JSC «Concern «SUW – Hidropribor», St. Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru

Svetlana S. Zharova, Lecturer, Department of Information Systems and Software Engineering, Baltic State Technical University «VOENMEH» n.a. D.F. Ustinov, St. Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: sszharova@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.08.2021

Принята к публикации: 30.10.2021

Адаптивное многослойное управление телеуправляемыми необитаемыми аппаратами

И.М. Данцевич¹, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье рассматривается самоорганизующаяся адаптивная система управления телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами. Адаптивная нейронная система многослойного управления построена по принципу декомпозиции мультичастотного набора входных сигналов, формируемых в адаптивном джойстике управления. Декомпозиция наборов последовательностей управляющих сигналов проходит процедуру трешолдинга, разделения по оценкам спектра мультичастотного сигнала управления. Каскадный алгоритм построен по принципу интерполяции и децимации коэффициентов фильтра. Трешолдинг реализуется свёрткой форматного кадра управляющего сигнала с коэффициентами всплеск формирующего фильтра в базисе всплесков Добеши. Интерполяция коэффициентов фильтра происходит сдвигом частоты, децимация схлопыванием коэффициентов фильтра. Спектральные оценки, построенные по среднеквадратическому значению спектра, укладываются в спектральный радиус нормированного сигнала и формируют матрицу математического ожидания адаптивного сигнала управления.

Реакции пилота телеуправляемого необитаемого подводного аппарата формируют управляющие сигналы в трёх плоскостях с заданными скоростями и моментами. Трешолдинг в базисе всплесков позволяет формировать сигналы управления с оптимальной крутизной выходной характеристики, что позволяет отказаться от необходимой ручной регулировки мощностей движителей двигательного-рулевого комплекса, при реализации полуавтоматического и автоматического управления.

Обратная связь системы управления по наблюдаемой динамике позволяет реализовать функцию автопилота, с учётом заданных критериев качества.

Ключевые слова: Двигательно-рулевой комплекс (ДРК), телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), трешолдинг сигналов управления, адаптивная нейронная система, адаптивная система управления, интерполяция коэффициентов фильтра, децимация коэффициентов фильтра, система всплесков Добеши, мультичастотные сигналы управления, нечёткая нейросистема (ННС), среднеквадратическое значение (СКЗ).

Adaptive multilayer management remotely operated underwater vehicle

Igor M. Dantsevich¹, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The article discusses the self-organizing adaptive system management remotely operated underwater vehicle. Adaptive neural system of multilayer control is built on the principle of decomposition of multi-frequency set of input signals generated in adaptive joystick of management. The decomposition of the sets of control signal sequences undergoes the procedure of tresholding, separation by estimates of the spectrum of the multi-frequency control signal. The cascade algorithm is based on the principle of interpolation and decimation of filter coefficients. Tresholding is implemented by convolving the format frame of the control signal with wavelet coefficients of the forming filter in the basis of Dobeshi wavelet. Interpolation of filter coefficients occurs by frequency shift, decimation by collapse of filter coefficients. Spectral estimates based on the standard value of the spectrum fit into the spectral radius of the normalized signal and form a matrix of mathematical expectation of the adaptive control signal.

The reactions of the pilot of a remotely operated underwater vehicle form control signals in three planes with given speeds and moments. Tresholding in the basis of wavelets allows you to generate control signals with an optimal slope of the output characteristic, which allows you to abandon the necessary manual adjustment of the powers of the propulsion engines of the engine-steering system, when implementing semi-automatic and automatic control.

Feedback of the control system according to the observed dynamics allows implementing the autopilot function, taking into account the specified quality criteria.

Keywords: Engine-steering system (ESS), remote operation vehicle (ROV), tresholding of control signals, adaptive neural system, adaptive management system, interpolation of filter coefficients, decimation of filter coefficients, Dobeshi-wavelet system, multi-frequency control signals, fuzzy neural system, root mean square value.

Введение

Реакции операторов телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов относятся к классу стационарных нелинейных сигналов [1]. Например, плавное и малое перемещение джойстиков управления требует уменьшение мощности упоров движительно-рулевого комплекса до минимального значения в условиях движения с соответствующими ограничениями по гидродинамическим показателям.

Значительное ускорение контроллера джойстика должно приводить к резкому возрастанию мощности

упоров и сокращении времени интегрирования (увеличение частоты дискретизации).

Системы имеющие настраиваемые параметры интегрирования относятся к полифазным (мультичастотным), а реакция на изменение мощности выходных сигналов на упоры движителей определяются алгоритмом вывода нейронной обучающей сети.

Следуя классическому определению нейронной многослойной сети управления [2], определим входной слой, содержащий матрицу измерения их элементов, как $X = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$.

Принимая функцию принадлежности гауссовского вида:

$$\gamma(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}, \quad (1)$$

где a, b, c – масштабные коэффициенты функции (ширина, наклон, центр).

Процедура трешолдинга решает задачу перебора термов нечётких множеств, как определено в таблице 1.

Таблица 1

Классификация термов нечётких множеств

Классификация множества	тип	символ
Высокий	H	$\gamma_h(x)$
Нормальный высокий	MH	$\gamma_{nh}(x)$
Нормальный низкий	ML	$\gamma_{nl}(x)$
Низкий	L	$\gamma_l(x)$

Формирование адаптивного алгоритма управления телеуправляемого необитаемого аппарата масштабированием сигналов управления

Для адаптивного оператора измерений вида [2-4]:

$$M[X_i X_i^T] = \begin{bmatrix} x_{0i}^2 & x_{0i}x_{1i} & x_{0i}x_{2i} & \dots & x_{0i}x_{ki} \\ x_{1i}x_{0i} & x_{1i}^2 & x_{1i}x_{2i} & \dots & x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{ki}x_{0i} & x_{ki}x_{1i} & x_{ki}x_{2i} & \dots & x_{ki}^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

предельная оценка определяется среднеквадратическим значением спектра (СКЗ) сложного сигнала управления. Адаптивная нечётко-нейронная система вывода по Сугено определяет треугольный вид функции принадлежности.

Система вывода рабочей функции содержит пять слоёв:

- входной слой, преобразования с функцией веса a_n ;
- слой фазификации по Сугено в базе всплесков Добеши;
- слой преобразования по коэффициентам полинома Бернштейна $b_1 \dots b_n$;
- слой вывода полюсов аппроксимированной ломаной l ;
- слой вывода массива линейных данных Y_i .

Генерирующая всплеск функция Добеши ($\hat{\phi}(\xi) = \chi_{[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]}(\xi)$), порождающая систему $\phi^{D,N}$, и входная функция $f(x)$ результатом свёртки $f * \phi: R^d \rightarrow (f * \phi)(x) = \int_{R^d} f(t)\phi(x-t)dt$.

Решающим правилом процедуры трешолдинга служит алгоритм качества выбора порядка всплеска для декомпозиции (мультиязычный анализ), определяемыми время-частотной локализацией всплеск функции, содержащей понятие центра x_f^* круга и радиуса $\Delta_f, \forall f \in L_2(R)$ с ненулевой нормой [2]:

$$x_f^* = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x |f(x)|^2 dx}{\|f\|^2}; \Delta_f = \frac{1}{\|f\|} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (x - x_f^*)^2 |f(x)|^2 dx \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

Переходя к оценкам нормы всплеск функции и СКЗ свёртки анализируемого сигнала и всплеск функции (определяя процесс как случайный, эргодический, стационарный, подчиняющегося нормальному распределению) определяем критерий выбора хорошей последовательности:

$$0,707 \leq |f|^2 / \|f\|^2 \leq 1, \quad (4)$$

в силу $\frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt = \sum_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{F_n}{2} \right)^2$,

где $F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$.

Для каждого сигнала из декомпозиций преобразование (4) имеет смысл, если адаптивная рабочая функция преобразования имеет линеаризованную форму.

Коррекция (линеаризация) характеристик может производиться по уровню спектральной плотности мощности. В этом случае скажем, что синтез скорректированного по всплескам вектора управления может быть выполнен по узловым точкам.

В алгоритме (3-4), определяем два массива – обучающую выборку (её норму) и измеренную на i -м шаге вычислений.

Полученные полюсы (максимумы по алгоритму (3-4)) фиксируются, как веса полиномов Бернштейна, параметром служит масштабный коэффициент всплеска Добеши.

Полученные кривые линии, построенные по полюсам полиномов Бернштейна, аппроксимируются ломаными. Точки перегиба, которых соответствуют масштабным сдвигам всплесков Добеши.

Треугольные функции Сугено соответствуют взаимокорреляционным функциям системы всплесков Добеши (прямоугольной формы), масштабные преобразования сдвиги и сжатия масштабирующей функции соответствуют временной задержке [7-9].

Возможность аппроксимации полиномами Бернштейна позволяет реализовать оптимальную кривую в динамике перемещения органов управления линейного манипулятора (кривая Безье).

Обучение нейронной сети осуществляется подбором весов (всплесков), при этом всплески Добеши позволяют добиться хорошей локализации по частоте и весам с масштабными коэффициентами D, N .

Самоорганизация вывода функции по Сугено имеет одну существенную проблему: при самообучении ННС возникает проблема параметра, значения которого меняются случайным образом, носят нерегулярный характер и требуют синхронизации параметров масштабирующих функций.

Ряд вычисленных значений полюсов, аппроксимирующих кривую (полученные по СКЗ декомпозиции входных последовательностей) и коэффициентов полиномов Бернштейна [5]:

$$S(t) = \sum_{i=0}^n a_i b_{i,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (5)$$

где $a_i, i \in 1:n$ – зафиксированные полюсы, аппроксимирующие кривую, $b_{i,n}(t)$ – полином Бернштейна:

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, i \in 1:n. \quad (6)$$

Отрезки, соединяющие фиксированные точки (полюсы), формируются по правилам таблицы 1.

Проблема вычисления параметра t , в (6) заключается в том, что масштабирующая функция $\phi^{D,N}$ с автокорреляционной функцией вида $R^{D,N}$ должна обладать компактным носителем. Произвольное число полюсов связаны линейными отрезками соответствующими полиномам Бернштейна первой степени. Следовательно, параметр t может колебаться в пределах от 0 до 1.

Для мультимножества:

$$D_N(t) := \left(\frac{1+t}{2}\right)^N \sum_{l=0}^{N-1} \binom{N-1+l}{l} \left(\frac{1-t}{2}\right)^l = \sum_{l=N}^{2N-1} \binom{2N-1}{l} \left(\frac{1+t}{2}\right)^l \left(\frac{1-t}{2}\right)^{2N-1-l}, \quad (7)$$

параметр t будет определяться задержкой на интервал l , такой, что в силу свойств всплесков Добеши:

$$m_l^a(\xi) = 2^{-1/2} \sum_{l=0}^{2N-1} h_N^a(l) e^{i2\pi l \xi}. \quad (8)$$

Реализация вычислений набора векторов управления осуществляется за счёт декомпозиции мультичастотного сигнала в фильтрах Добеши соответствующего порядка с маской (8).

Для управления в продольной плоскости кривая задаваемых пространственных положений манипулятора аппроксимируется сплайнами, как показано на рисунке 1.

Аналогично, для пространственного перемещения ТНПА в трёхмерном пространстве набор векторов управляющих сигналов позволяет рассматривать выпуклую фигуру. Координаты точек задаются в виде двумерных массивов. Предположим, что нужно получить набор сигналов управления распределённых по случайному закону в массиве $[0,1] \times [0,1] \times [0,1]$.

Средствами MATLAB мы получим выпуклую фигуру, приведенную на рисунке 3.

Выбирая требуемый тип управления, возникает необходимость уменьшения или увеличения мощности двигателей, для реализации рабочей программы управления ТНПА. Считаем этот процесс масштабированием системы управления, когда, например медленной реакции рук пилота и малым перемещениям джойстика должен также соответствовать соответствующий набор сигналов переключения двигателями.

Помимо логики переключения двигателями, необходимо выполнить декомпозицию сигналов управления в банках анализирующих фильтров каскадного исполнения, рисунок 2.

На рисунке 2 символами $[a_1, \dots, a_6]$ обозначении весовые коэффициенты входного преобразования векторов управления от джойстиков. Трешолдинг входных векторов управления обеспечивается в банке фильтров Добеши порядка $F_n(z)$, при невыполнении условия трешолдинга каскадный алгоритм квантования формирует дерево фильтрации, сдвигами отсчётов коэффициентов фильтров.

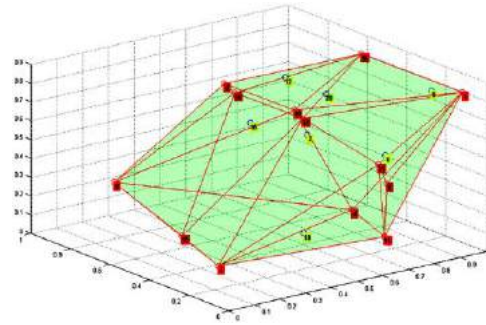


Рис. 1. Матрица команд манипулятора, заданных случайным образом, грани выпуклой фигуры соответствуют параметру t , углы наклона – скоростным реакция пилота ТНПА

Вектор выходных коэффициентов соответствует масштабным преобразованиям сигналов управления и маске гидродинамических коэффициентов ТНПА, в зависимости от комбинации матрицы векторов управляющих сигналов $[b_1, \dots, b_6]$.

Трешолдинг реализуется квантователями фильтра Добеши использующих принципы многомерных многоскоростных систем [6]. Каждый нейрон образуется (элемент банка фильтров) образуется комбинацией экстраполяторов или дециматоров фильтра.

Процесс формирования состоит в свертке коэффициентов многомерного фильтра (банка фильтров), взятых в моменты времени (квантование) определяемых устройством пространственно-временного сдвига (синтезатор частоты отсчётов).

Критерием перехода (сдвига частоты синтезатора) является условие (4), чем реализуется дерево алгоритма трешолдинга многомерного сигнала управления.

Все четыре двигателя расположенные в плане платформы отсека плавучести, формирование сигналов управления двигателями обеспечивается сочетанием тяги двигателей обеспечивающих вращение ТНПА и поступательное движение.

В предложенной модели управления двигатели работают попарно, с переключениями, возникающий в системе перекос управления формирует направление и скорость движения, по характеристикам представленным на рисунке 3.

Скажем, что перемещение ТНПА вперёд чередуется с вращением в продольно-поперечной плоскости, как показано на рисунке 3:

- уровень сигнала управления вектора U_1 изменяется на величину $U_1 = 0:4:16$;
- вектор разворачивающего момента U_2 изменяется на величину $U_2 = 16:4:0$;
- ТНПА перемещаясь вперёд имеет также динамику разворота.

Такой тип движения достаточно часто встречается на практике, когда ТНПА перемещающийся вперёд, может иметь момент вызванный течением, компенсация момента, обеспечивается перекосом тяги двигателей [3].

При рассмотрении такой задачи, очевидно, что скорость перемещения ТНПА и скорость разворота будут различаться.

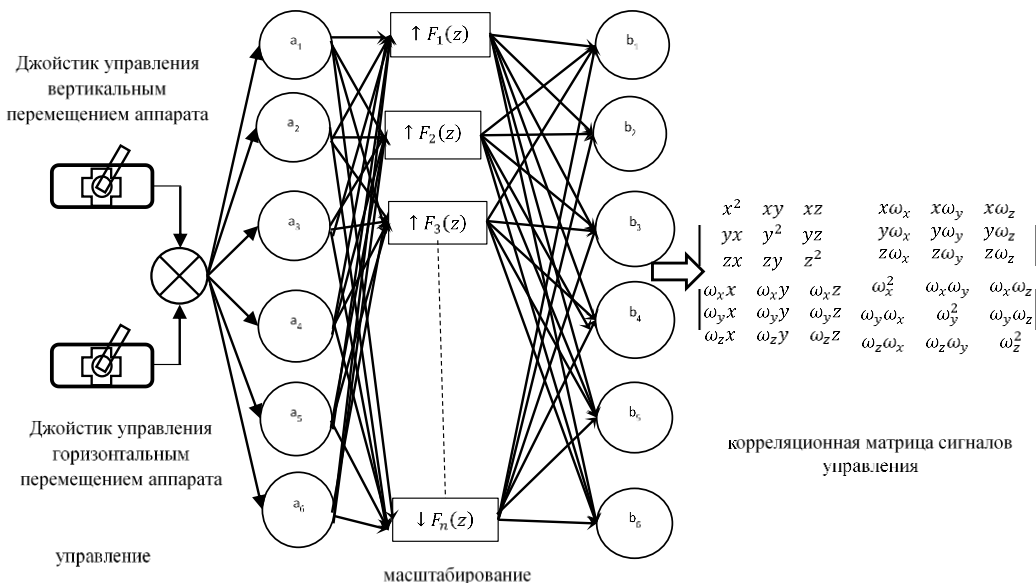


Рис. 2 Формирование адаптивного алгоритма управления ТНПА: $a_1 \dots a_6$ – входные коэффициенты преобразования; $\uparrow F_1(z)$ – интерполирующий оператор фильтра Добеши; $\downarrow F_n(z)$ – децимирующий оператор фильтра Добеши; $b_1 \dots b_6$ – формирующие выходные коэффициенты системы управления

В такой постановке рассматриваем задачу управления движителями, оценка параметров движения по решающей обратной связи будут рассмотрены ниже.

По опорным калибровочным точкам движителей определяем $s = 4 - 1 = 3$, т.е. сигнал управления поступательного движения ТНПА изменяется по правилу $U_1 = 4,8,12,16$ получаем три точки полиномиального приближения, так как выбраны четыре калибровочные точки графика.

Аналогично изменяется сигнал управления разворотом вправо $U_2 = 16,12,8,4$.

Перекрестное управление в асимптотике полиномов Бернштейна описывается как:

$$P_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s P_i \cdot K_{n,i}(t), \quad (9)$$

$$K_{n,i}(t) = \binom{s}{i} t^i (1-t)^{s-i}, \quad (10)$$

$$\binom{s}{i} = \frac{s!}{i!(s-i)!} \quad (11)$$

Значения сигналов управления в калибровочных точках определим, по характеристикам на рисунке 3, и используя таблицы вычисленных значений (приложение 2):

$$P_{x1}(4\ 148,45); P_{x2}(8\ 296,89); P_{x3}(12\ 368,80); P_{x4}(16\ 391,91) \quad (12)$$

Вычисленные значения полиномов $K_{n,i}(t)$:

$$\begin{aligned}
 K_{3,0}(t) &= (1-t)^3; \\
 K_{3,1}(t) &= 3t(1-t)^2; \\
 K_{3,2}(t) &= 3t^2(1-t); \\
 K_{3,3}(t) &= t^3.
 \end{aligned} \quad (13)$$

Вычисленное значение восьми точек асимптотики, для параметра t , нормированное

значение частоты дискретизации фильтра, входящего в банк анализирующих фильтров, таблица 2.

Полученные значения силы упоров движителя имеют перекрестное управление, цель которого создание поворачивающего момента M_y , позволяющего двигаться ТНПА вперёд с вращением относительно оси y .

Используя правило переключения упоров движителей, определим наборы сил создаваемых каждым из движителей ТНПА при реализации указанного типа движения, из расчётных таблиц:

$$\begin{aligned}
 P_1 = P_4 &= (4\ 16,40); P_2 = P_2(4\ 88,57); P_1 = P_4 = \\
 &= (8\ 34,44); P_2 = P_2(8\ 34,44); P_1 = P_4 = \\
 &= (12\ 50,84); P_2 = P_2(12\ 209,93); P_1 = P_4 = \\
 &= (16\ 67,24); P_2 = P_2(16\ 209,93).
 \end{aligned} \quad (14)$$

Таблица 2

Вычисленные значения коэффициентов асимптотики силы тяги ДРК

t	$K_{3,0}$	$K_{3,1}$	$K_{3,2}(t)$	$K_{3,3}(t)$
0	1	0	0	0
0,125	0.6699	0.2871	0.0410	0.0019
0,250	0.4218	0.4218	0.1406	0.0156
0,375	0.2441	0.4394	0.2636	0.0527
0,5	0.125	0.375	0.375	0.125
0,625	0.0527	0.2636	0.4394	0.2441
0,75	0.0156	0.1406	0.4218	0.4218
0,875	0.0019	0.0761	0.2871	0.6699
1	0	0	0	1

Согласно (9):

$$P_{\Sigma 1}(0) = 1 \cdot P_{x1} = 1 \cdot (4\ 148,45) = (4\ 148,45);$$

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma 2}(0,125) &= 0.6699 \cdot P_{x1} + 0.2871 \cdot P_{x2} + 0.0410 \cdot P_{x3} + 0.0019 \cdot P_{x4} = (5.4988 \quad 200.5493); \\
 P_{\Sigma 3}(0,25) &= 0.4218 \cdot P_{x1} + 0.4218 \cdot P_{x2} + 0.1406 \cdot P_{x3} + 0.0156 \cdot P_{x4} = (6.9984 \quad 245.8127); \\
 P_{\Sigma 4}(0,375) &= 0.2441 \cdot P_{x1} + 0.4394 \cdot P_{x2} + 0.2636 \cdot P_{x3} + 0.0527 \cdot P_{x4} = (8.498 \quad 284.5636); \\
 P_{\Sigma 5}(0,5) &= 0.125 \cdot P_{x1} + 0.375 \cdot P_{x2} + 0.375 \cdot P_{x3} + 0.125 \cdot P_{x4} = (10 \quad 317.1887); \\
 P_{\Sigma 6}(0,625) &= 0.0527 \cdot P_{x1} + 0.2636 \cdot P_{x2} + 0.4394 \cdot P_{x3} + 0.2441 \cdot P_{x4} = (11.498 \quad 343.8189); \\
 P_{\Sigma 7}(0,75) &= 0.0156 \cdot P_{x1} + 0.1406 \cdot P_{x2} + 0.4218 \cdot P_{x3} + 0.4218 \cdot P_{x4} = (16.5164 \quad 364.9597); \\
 P_{\Sigma 8}(0,875) &= 0.0019 \cdot P_{x1} + 0.0761 \cdot P_{x2} + 0.2871 \cdot P_{x3} + 0.6699 \cdot P_{x4} = (14.78 \quad 391.3519); \\
 P_{\Sigma 9}(1) &= 1 \cdot P_{x4} = (16 \quad 391,99).
 \end{aligned} \tag{15}$$

В матричной форме:

$$P_{\Sigma}(t) = [(1-t)^3 \quad 3t(1-t)^2 \quad 3t^2(1-t) \quad t^3] \cdot \begin{bmatrix} P_{x1} \\ P_{x2} \\ P_{x3} \\ P_{x4} \end{bmatrix}; \tag{16}$$

Или с учётом группировки коэффициентов матрица:

$$P_{\Sigma}(t) = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{x1} \\ P_{x2} \\ P_{x3} \\ P_{x4} \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Изменение сил тяги ДРК приводит к поступательному движению ТНПА вперёд, а момент, вызванный заданный неравномерным распределением упоров каждого из двигателей, попарно с переключениями согласно матрице переключений, к вращению ТНПА.

Аналогично задаче вычисления упоров и моментов, определяется интерполяцией упоры двигателей при реализации движения вперёд с поворотом направо $U_1 > 0$ и $U_2 > 0$.

Для комбинации управления по калибровочным точкам (14), аналогично используя асимптотику полиномов Бернштейна (13) вычисляются значения упоров попарно консолидированных двигателей.

На рисунках 3-5 приведены рассчитанные калибровочные графики сил, моментов и упоров двигателей при реализации различного типа перемещений ТНПА. Рассмотренный алгоритм позволяет решать задачу масштабирования системы управления, в зависимости от задаваемой пилотом динамики ТНПА. Масштабирование системы управления обеспечивается банком фильтров Добеши четвёртого порядка.

Динамика ТНПА, в том числе при выполнении работ бортовым комплектом инструментов, может описываться набором векторов движения в продольно-поперечной плоскости.

Наиболее важными с точки зрения практики считаются перемещения в продольно-поперечной плоскости с нулевым креном и деферентом.

Подводно-технические работы проводятся обычно на некоторой глубине залегания объекта, или в горизонте подводного рельефа, по этим причинам требуется выполнение расчётов для продольно-поперечного типа перемещения ТНПА [9-11].

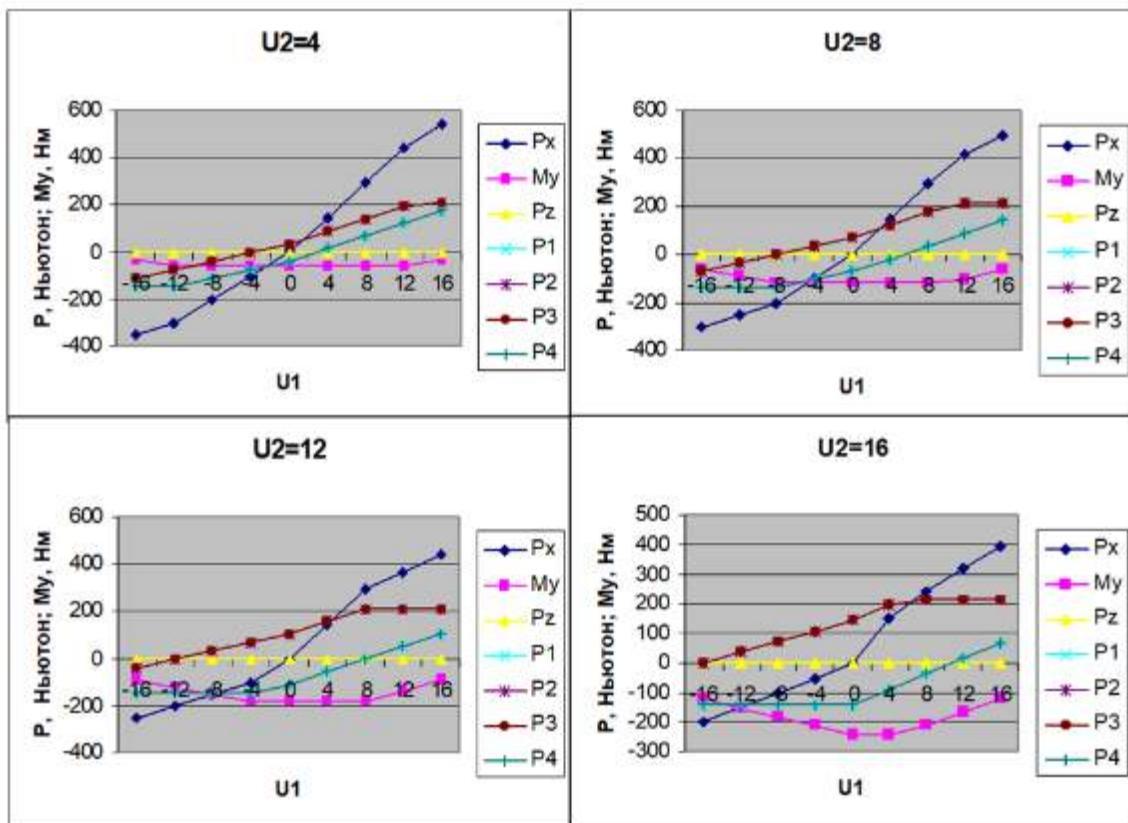


Рис.3 Калибровочные характеристики ДРК ТНПА

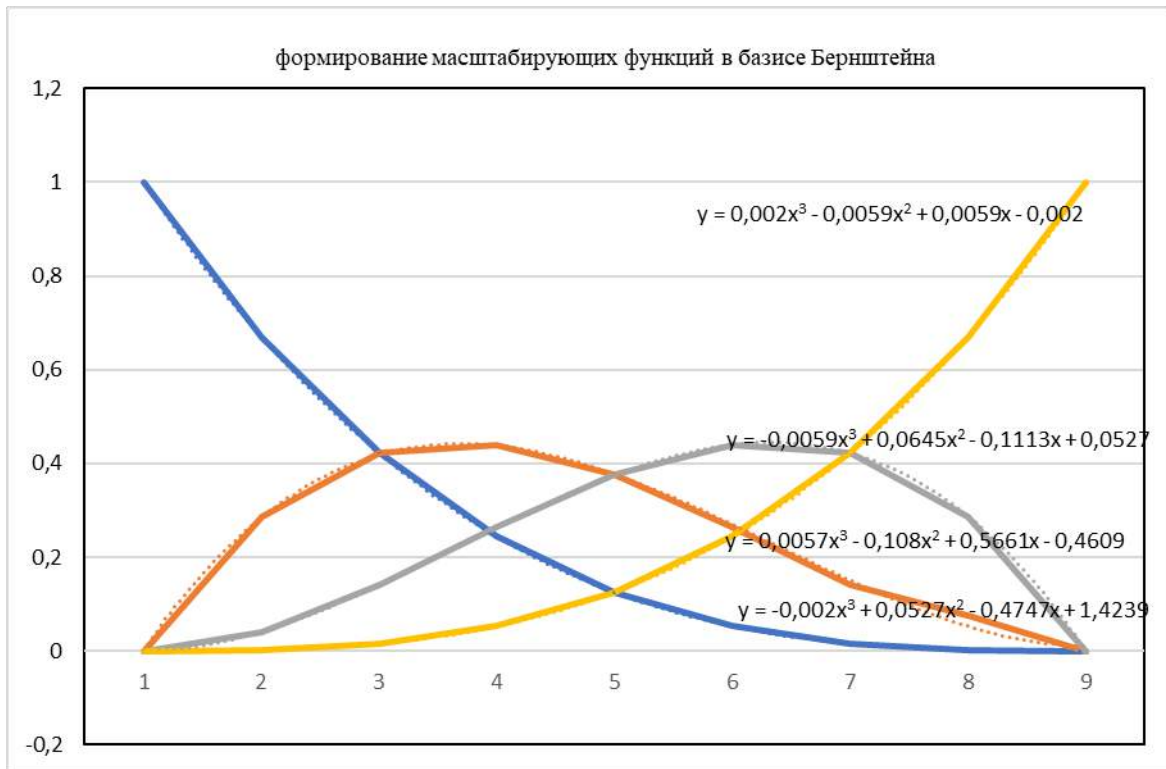


Рис. 4 Весовые функции обучающих кривых полиномов Бернштейна полученных по алгоритму (13)

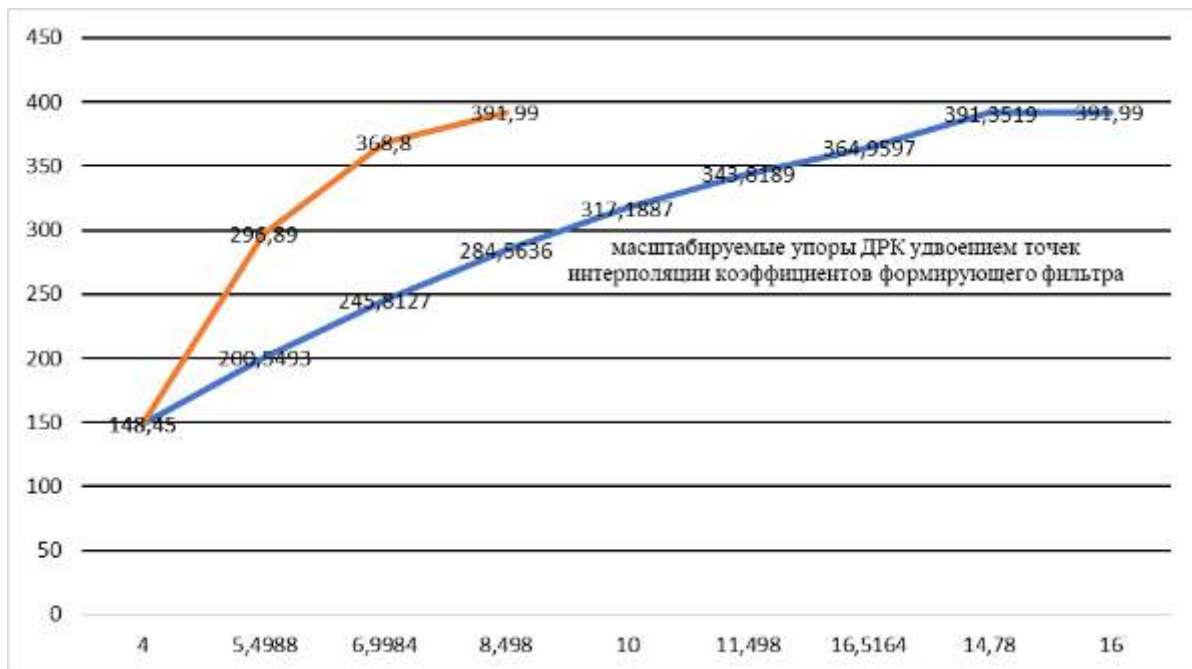


Рис. 5 Масштабирование упоров ДПК удвоением точек интерполяции анализирующего фильтра Добеши с пересчётом к упорам движителей

Заключение

Статическая устойчивость ТНПА реализуется плохообтекаемыми формами, при которых наибольшее влияние на статику оказывают присоединённые массы воды в проекции движения.

Реализация управления обеспечивается на уровне пилота декомпозицией набора сигналов управления в базисе ортогональных функций

посредством всплеск-преобразования задающих движений ТНПА уровней управления.

Классическая фильтрация применением оконных преобразований с использованием различных алгоритмов даёт различный разброс спектральных характеристик по различным методам до 100% по значению спектральной плотности декомпозиции.

Применение всплеск-преобразований позволяет полностью восстанавливать в отличие от оконных методов спектрального анализа фазу и амплитуду реализации.

Литература

1. Chin, C.S., Lin, W.P. & Lin, J.Y. Experimental validation of open-frame ROV model for virtual reality simulation and control. *J Mar Sci Technol* 23, 267–287 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0469-3>
2. Данцевич И. М., Звягинцев Н.С., Тарасенко А.А. Управление необитаемыми подводными аппаратами (монография) Издательство: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. Новороссийск, 2012
3. Alireza Marzbanrad, Mohammad Eghtesad, Jalil Sharafi, Reza Kamali. Design, construction and control of a remotely operated vehicle (rov). Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011 November 11-17, 2011, Denver, Colorado, USA.
4. R. D. Christ, R. L.Wernli, The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles, Butterworth-Heinemann, is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803 First edition 2007
5. Lakhekar, G.V., Waghmare, L.M. Robust maneuvering of autonomous underwater vehicle: an adaptive fuzzy PI sliding mode control. *Intel Serv Robotics* 10, 195–212 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11370-017-0220-2>
6. G. Lakhekar, L. Waghmare, Prakash. G. Jadhav, Rupam Gupta Roy. Robust Diving Motion Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using Adaptive Neuro-Fuzzy Sliding Mode Technique – Computer Science. IEEE Access 2020
7. Zheping Yan, M. Wang, J. Xu Robust adaptive sliding mode control of under actuated autonomous underwater vehicles with uncertain dynamics. *Computer Science*. 2019
8. F. Tabataba'i-Nasab, Ali Keymasi Khalaji, S. A. Moosavian Adaptive nonlinear control of an autonomous underwater vehicle. *Computer Science*. 2019
9. Auwal Shehu Tijjani, A. Chemori, V. Creuze Robust Adaptive Tracking Control of Underwater Vehicles: Design, Stability Analysis and Experiments. *Computer Science*. 2020
10. Han Han, Yanhui Wei, Xiufen Ye, W. Liu Modeling and Fuzzy Decoupling Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System. *Computer Science*. IEEE Access. 2020
11. Ma Chuan, Liu Yan Cheng Nonlinear disturbance observer-based finite-time Trajectory Tracking Control of Unmanned Underwater Vehicles. *Computer Science*. 2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). 2018

References

1. Chin, C.S., Lin, W.P. & Lin, J.Y. Experimental validation of open-frame ROV model for virtual reality simulation and control. *J Mar Sci Technol* 23, 267–287 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0469-3>
2. Dantsevich I.M., Zvyagintsev N.S., Tarasenko A.A. Upravlenie neobitaemyumi podvodnyumi apparatami [Control of uninhabited underwater vehicles (monograph)] Publishing house: Admiral Ushakov Maritime State University. Novorossiysk, 2012.
3. Alireza Marzbanrad, Mohammad Eghtesad, Jalil Sharafi, Reza Kamali. Design, construction and control of a remotely operated vehicle (rov). Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011 November 11-17, 2011, Denver, Colorado, USA.
4. R.D. Christ, R. L.Wernli, The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles, Butterworth-Heinemann, is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803 First edition 2007
5. Lakhekar, G.V., Waghmare, L.M. Robust maneuvering of autonomous underwater vehicle: an adaptive fuzzy PI sliding mode control. *Intel Serv Robotics* 10, 195–212 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11370-017-0220-2>
6. G. Lakhekar, L. Waghmare, Prakash. G. Jadhav, Rupam Gupta Roy. Robust Diving Motion Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using Adaptive Neuro-Fuzzy Sliding Mode Technique – Computer Science. IEEE Access 2020
7. Zheping Yan, M. Wang, J. Xu Robust adaptive sliding mode control of under actuated autonomous underwater vehicles with uncertain dynamics. *Computer Science*. 2019
8. F. Tabataba'i-Nasab, Ali Keymasi Khalaji, S. A. Moosavian Adaptive nonlinear control of an autonomous underwater vehicle. *Computer Science*. 2019
9. Auwal Shehu Tijjani, A. Chemori, V. Creuze Robust Adaptive Tracking Control of Underwater Vehicles: Design, Stability Analysis and Experiments. *Computer Science*. 2020
10. Han Han, Yanhui Wei, Xiufen Ye, W. Liu Modeling and Fuzzy Decoupling Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System. *Computer Science*. IEEE Access. 2020
11. Ma Chuan, Liu Yan Cheng Nonlinear disturbance observer-based finite-time Trajectory Tracking Control of Unmanned Underwater Vehicles. *Computer Science*. 2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). 2018

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Данцевич Игорь Михайлович, кандидат технических наук, исполнительный директор НИИ, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Igor M. Dantsevich, Ph.D. (Eng), Executive Director of Research Institute, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin Avenue, 93, Novorossiysk, Russia, 353924, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Поступила в редакцию: 30.10.2021
Принята к публикации: 17.11.2021

УДК 004.9:004.41

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.060>

Ускорение работы подводной системы технического стереозрения с помощью многопоточной организации алгоритмов

П.В. Жилияков¹, e-mail: yany_@mail.ru, С.И. Фатеев¹, e-mail: fateev-si@ya.ru
¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. В настоящей работе дано описание многопоточной параллельной организации работы алгоритмов, входящих в состав программной части подводной системы технического стереозрения подводного робота. Данные, полученные системой технического стереозрения, в последствии поступают на систему управления для выполнения операций по управлению роботом и оператору на экран монитора для последующего принятия им управленческих решений. В большинстве случаев выполнение алгоритмов происходит последовательно. Суммарное время обработки одного кадра складывается из времени работы всех алгоритмов, входящих в состав программной части. Таким образом, в однопоточном режиме даже самые быстрые алгоритмы будут ожидать своей очереди на выполнение. Следовательно, система управления и оператор в случаях, требующих большие вычислительные мощности, будут получать данные недостаточно быстро. Естественно для увеличения быстродействия всей программной части возникает потребность организовать работу входящих в состав алгоритмов параллельно, многопоточно, но такой способ организации работы дополнительно создаёт ряд проблем, которых бы не было, если работа алгоритмов была организована последовательно, однопоточно. В статье приведены способы решения этих проблем, проведено сравнение времени работы многопоточной и однопоточной реализации алгоритмов.

Ключевые слова: компьютерное зрение, подводная система технического стереозрения, стереозрение, стереомодуль, многопоточность, многопоточное программирование, параллельные вычисления.

Acceleration of the underwater system of technical stereo vision with the help of multithreaded organization of algorithms

Pavel V. Zhilyakov¹, e-mail: yany_@mail.ru, Sergey I. Fateev¹, e-mail: fateev-si@ya.ru
¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Annotation. This paper describes the multithreaded parallel organization of the algorithms that are part of the software of the underwater system of technical stereo vision of an underwater robot. The data obtained by the technical stereo vision system is subsequently transmitted to the control system to perform robot control operations and to the operator on the monitor screen for subsequent management decisions. In most cases, the algorithms are executed sequentially. The total processing time of one frame consists of the operating time of all algorithms included in the software part. Thus, in single-threaded mode, even the fastest algorithms will be waiting for their turn to execute. Consequently, the control system and the operator in cases requiring large computing power will not receive data quickly enough. Naturally, in order to increase the speed of the entire software part, there is a need to organize the work of the algorithms included in parallel, multithreaded, but this way of organizing work additionally creates a number of problems that would not exist if the algorithms were organized sequentially, single-threaded. The article presents ways to solve these problems, compares the operating time of multithreaded and single-threaded implementation of algorithms.

Key words: computer vision, underwater vision system, stereo vision, stereo module, multithreading, multithreaded programming, parallel computing.

Введение

Обычно, программная часть системы технического стереозрения (СТС) состоит из нескольких отдельных алгоритмов, которые в большинстве случаев выполняются последовательно. В качестве примера в состав программной части СТС, в которой авторы статьи принимали участие, входили такие алгоритмы [1]:

- алгоритм захвата стереопары (изображений с левой и правой камер стереокамеры);
- алгоритм поиска 3D точек на поверхности наблюдаемого объекта;
- алгоритм обнаружения объектов (кластерный анализ и др.);
- алгоритмы слежения за выбранным объектом и обработки других действий оператора по клику указателем мыши на изображении;
- алгоритм нанесения новой информации на изображение, полученной в результате её анализа;

– алгоритмы GUI интерфейса и вывода информации на экран.

Данные, полученные системой технического стереозрения, в последствии поступают на систему управления для выполнения операций по управлению роботом и оператору на экран монитора для последующего принятия им управленческих решений. В ряде случаев вместо оператора может использоваться система супервизорного управления (автоматическая система принятия решений) [2]. В системах управления, в том числе системах супервизорного управления, имеет значение скорость получения информации. Чем меньше длительность обработки, тем больше информации можно получить о внешней среде и передать системе супервизорного управления.

Так как в большинстве случаев выполнение алгоритмов происходит последовательно, суммарное время обработки одного кадра складывается из времени работы всех алгоритмов, входящих в состав программной части. Но, если один из алгоритмов выполняется медленно, то и общая реализация всей программной части будет

выполняются медленно. В режиме реального времени это будет выглядеть как подтормаживания или зависания картинки на экране оператора.

Естественно, для увеличения быстродействия всей программной части возникает потребность организовать работу входящих в состав алгоритмов параллельно, многопоточно, но такой способ организации работы дополнительно создаёт ряд проблем, которых бы не было, если работа алгоритмов была организована последовательно. Среди возникающих проблем можно выделить такие:

1) общие данные (изображения, координаты 3д точек, результаты кластерного анализа) используются одновременно, возникает конфликт;

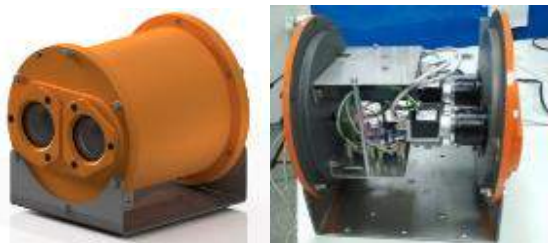
2) данные на выходе алгоритмов могут относиться к разным стереопарам стереокамеры;

3) некоторые алгоритмы выполняются настолько быстро, что выполняют обработку одного кадра изображения многократно, с частотой выше скорости обновления кадров камеры, это приводит к лишним вычислительным затратам и к росту количества обращений к общим данным (одновременно общие данные могут, использоваться только одним алгоритмом, другие ждут своей очереди);

4) некоторые алгоритмы с большим временем исполнения (с большими вычислительными затратами), для которых нет возможности разделить их на отдельные части для параллельной организации их работы.

1. Постановка задачи

Ставится задача реализовать многопоточный режим работы алгоритмов для подводной СТС и решить вышеуказанные проблемы, возникающие в результате многопоточной организации работы алгоритмов.



а

б

Рис. 1. Действующая подводная система технического стереозрения (а) вид модуля в собранном состоянии (б) внутренняя часть модуля

Используемая в экспериментах подводная СТС представлена на рисунке 1, включает в себя:

- две камеры Basler acA1920-50gc (составленные в стереомодуль) с объективами Lens TS0814-MP F1.4 f8mm 1";
- PoE коммутатор 1000 Мбит/с;
- герметичный корпус с герметичными разъёмами для коммутации к внешнему оборудованию;
- компьютер (ПК) с операционной системой Windows 10. Тип центрального процессора 12-Core Intel Core i9-7920X, 2.90 ГГц. Оперативная

память 64 Гб. Видеоадаптер: nVIDIA GeForce RTX 2080 Ti;

– кабель UTP для передачи данных по протоколу Ethernet (Gigabit Ethernet) и для питания стереокамеры через технологию PoE.

Через кабель UTP по протоколу Gigabit Ethernet. передаётся по 2 кадра со стереокамеры в несжатом формате данных 15 кадров в секунду с каждой камеры в синхронном режиме (два кадра в один момент времени) с разрешением 1920 x 1200 пикселей.

Большой размер кадра, соответственно большое количество данных на входе алгоритмов приводят на порядок повысить точность СТС, но приводит к большим вычислительным затратам. Это повышает время работы в однопоточном режиме, поэтому возникает потребность организовать работу входящих в состав алгоритмов параллельно, многопоточно.

Данная подводная система компьютерного стереозрения позволяет обеспечивать:

– обнаружение объектов и получение 3D координат с линейными размерами не менее 0,03 м, и точностью отображения контура внешней поверхности не менее 0,03 м;

– слежение за wybranными оператором объектами, скорость движения которых не превышает 0,05 м/с;

– проведение произвольных измерений – расчёт расстояний в пространстве между двумя wybranными оператором произвольными точками с точностью не более 0,03 м;

Программная часть написана на языке C++ (Qt 5.15, компилятор MSVC 2019 x64) с использованием библиотек OpenCV, pyclustering, Pylon.

2. Материалы и методы

Существует два базовых подхода для распараллеливания вычислений: распараллеливание по данным и распараллеливание по задачам (инструкциям). Для решения поставленной задачи выбран подход распараллеливания задач, так как в используемой подводной СТС имеется достаточное количество алгоритмов, каждый из которых выполняет свои задачи. Распараллеливание по данным не применялось, так как для большинства используемых алгоритмов невозможно разделить данные на части, а там, где это можно сделать, нет существенной надобности, в связи с тем, что эти алгоритмы выполняются достаточно быстро.

Для реализации многопоточной работы алгоритмов в качестве основного вычислительного устройства используется многоядерный процессор (CPU).

Для решения описанных ранее во введении проблем были выбраны следующие методы (соответственно нумерации проблем во введении):

1) при обращении к общим данным применять управление конкурентными потоками через использование мьютексов (англ. mutex, от mutual exclusion — «взаимное исключение») — одноместный семафор, служащий в программировании для управления конкурентными потоками;

2) синхронизация данных (организация параллельной работы алгоритмов таким образом, чтоб данные на выходе алгоритмов относились к одному кадру);

3) синхронизация времени выполнения потоков через управление временем работы каждого потока;

4) Использование ресурсов видеокарты (GPU) для ускорения выполнения некоторых алгоритмов с большим временем выполнения и которые невозможно разделить на отдельные части (задачи).

Однако, стоит отметить, что при организации работы алгоритмов на GPU:

- повысит требования к видеокарте ПК;
- усложнит перенос программного обеспечения на другой ПК, в связи с тем, что необходимо устанавливать и настраивать дополнительное программное обеспечение;
- повысит энергопотребление вычислительного модуля.

Для работы СТС в однопоточном последовательном режиме используется один основной цикл, в котором выполняются алгоритмы, выполняющие кадровую обработку данных. В тело этого цикла не входят процедуры активации устройств и инициализации данных. В многопоточной параллельной организации работы алгоритмов каждый поток имеет свой отдельный цикл, в котором выполняется один или несколько алгоритмов.

На рисунке 2 приведена схема распределения алгоритмов по циклам потоков для используемой в экспериментах подводной СТС. При распределении алгоритмов по потокам использовался принцип равномерного распределения вычислительных затрат среди потоков.

Краткое описание алгоритмов:

1) поток 1: алгоритм захвата стереопар со стереокамеры (снимки с левой и правой камер стереокамеры);

2) поток 2: алгоритм поиска 3D точек на поверхности наблюдаемого объекта (используется алгоритм построения карты диспаратности);

3) поток 3: алгоритм обнаружения объектов (кластерный анализ и др.); алгоритмы слежения за

выбранным объектом; алгоритм обработки других действий оператора по клику указателем мыши на изображении;

4) поток 4: алгоритм анализа данных (построение моделей (примитивов) обнаруженных объектов и др.);

5) поток 5: алгоритм нанесения новой, полученной в результате анализа, информации;

6) поток 0 (основной поток или поток родитель): GUI интерфейс и вывода информации на экран.

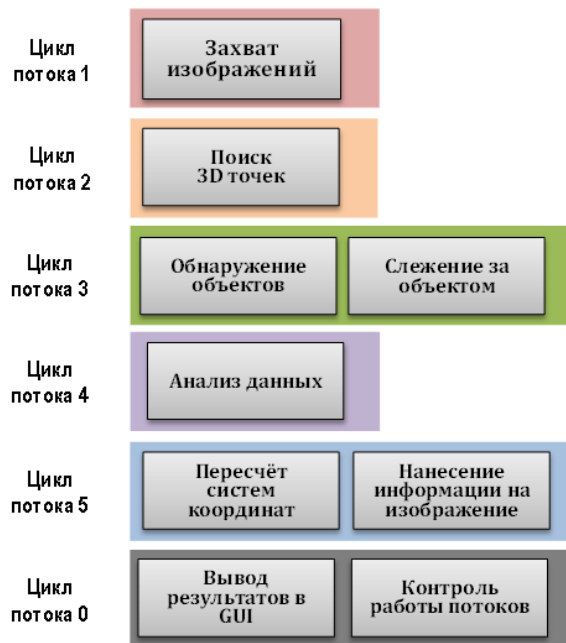


Рис. 2. Распределение алгоритмов технического стереозрения по потокам

Более подробное описание алгоритмов, применяемых в используемой подводной СТС приведено в статьях [3,4]. На рисунке 3 приведена общая схема работы разработанной программы в многопоточном режиме.

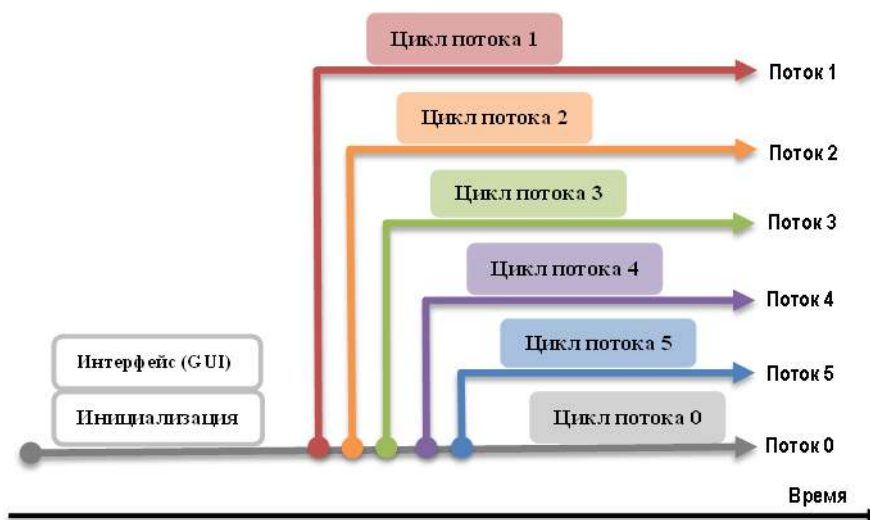


Рис. 3. Схема работы программы в многопоточном режиме

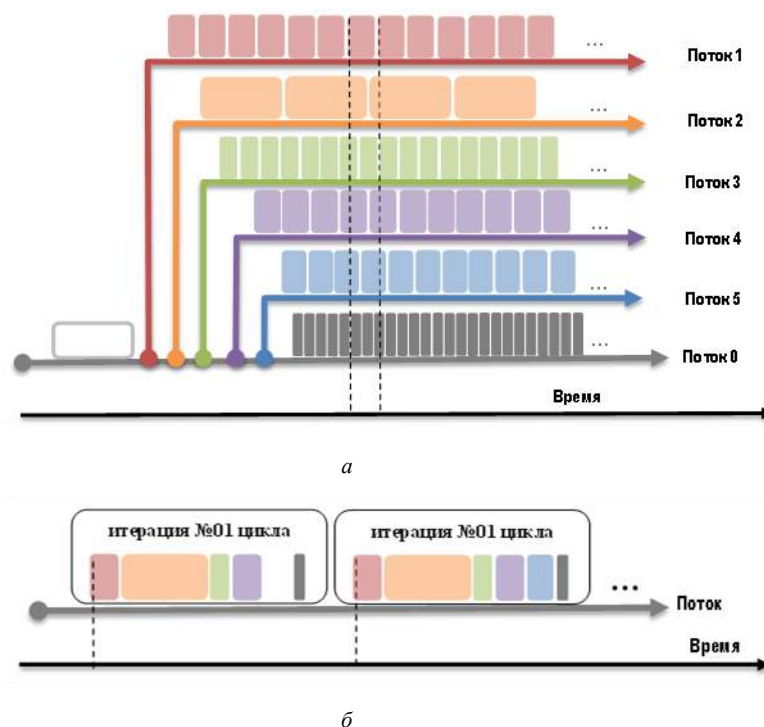


Рис. 4. Сравнение времени между соседними запусками конкретного алгоритма в многопоточном и однопоточном режимах: а) многопоточном, б) однопоточном

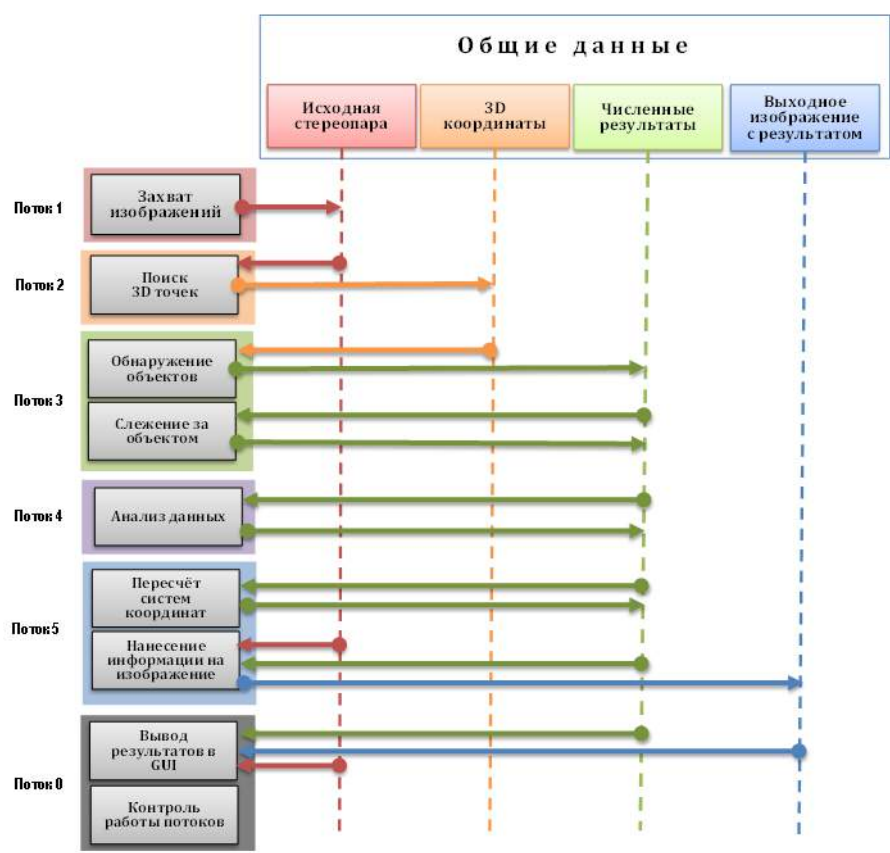


Рис. 5. Схема работу алгоритмов с общими данными в многопоточном режиме

На рисунке 4 приведено сравнение времени между соседними запусками одного из алгоритмов в многопоточном и однопоточном режимах. В многопоточном режиме даже самые быстрые

алгоритмы будут ожидать своей очереди на выполнение. Следовательно, система управления и оператор в случаях, требующих большие вычислительные мощности, будут получать данные недостаточно быстро.

На рисунке 5 дано схематическое описание взаимодействия алгоритмов с общими данными в многопоточном режиме.

3. Результаты

После создания программного обеспечения многопоточной организации работы подводной СТС проведён ряд экспериментов по замерам времени работы потоков в многопоточном режиме. В таблице 1 проведено сравнение времени работы потоков и всей программы в многопоточном и однопоточном режимах.

Таблица 1

Среднее время работы одной итерации цикла потока

N/ N	Алгоритмы	Среднее время работы (мс)	
		Многопоточный режим	Однопоточный режим
1.	Потока 1	65	60
2.	Потока 2	190 (GPU:110)	160 (GPU:85)
3.	Потока 3	35	30
4.	Потока 4	60	40
5.	Потока 5	50	45
6.	Потока 0	5	5
Вся программа		190 (поиск 3D точек) 65 (вывод данных)	340

При параллельной работе алгоритмов скорость работы всей программной части определяется временем работы потока, который имеет наибольшее время работы. Из таблицы 1 видно, что поток 2, в котором работает алгоритм поиска 3D точек, определяет время работы всей системы. Скорость обработки кадров в этом потоке 5 кадров в секунду. Важной особенностью данной многопоточной реализации работы алгоритмов является то, что скорость захвата и скорость вывода изображений выше и составляет 15 кадров в секунду. Таким образом, визуально на экран оператора изображение выводится близко к реальному времени, а обработка данных медленнее, но в 2 раза быстрее, чем это бы происходило в однопоточном режиме.

При однопоточной организации работы скорость работы всей программы 3 кадра в секунду.

Так как в многопоточной реализации программной части самый медленный – это поток 2 и

его нет возможности разделить на отдельные части (задачи), алгоритм поиска 3D точек был реализован на видеокарте GPU. Это позволило увеличить скорость работы потока 2 до 9 кадров в секунду

Время выполнение алгоритмов в однопоточном режиме быстрее времени выполнения в потоках в многопоточном режимах. Это связано с тем, что алгоритмы не могут использовать общие данные одновременно, данные используются в порядке очереди.

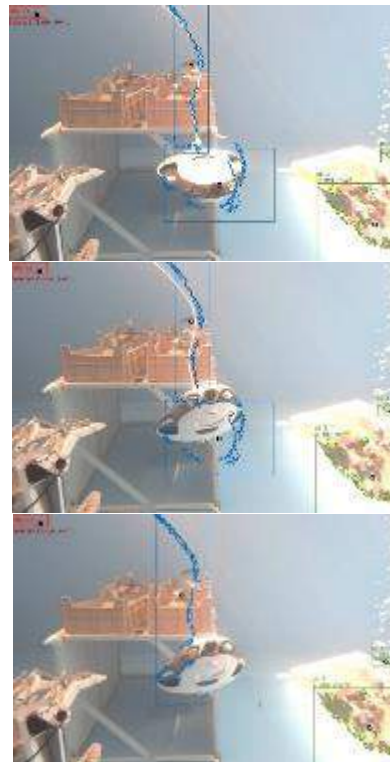


Рис. 6. Разница скорости вывода изображений и обработки данных

Выводы

В результате многопоточной организации выполнения алгоритмов удалось повысить скорость работы подводной системы технического стереозрения. Быстродействие программы увеличилось почти в 2 раза (в 3 раза, при реализации части алгоритмов на GPU). Так же удалось увеличить скорость обновления кадров на экране оператора в 5 раз, то есть воспроизводить видео почти без задержек. Это позволило повысить удобство работы оператору и скорость принятия решения по выдаче управленческих команд.

Описанная структура многопоточной организации делает любую из систем управления более способной и надёжной к выполнению своих функций.

Дополнительная информация

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №075-01027-21-01 от 28.09.2021.

Additional Information

The research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the basic part of the state order №075-01027-21-01 от 28.09.2021.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность Скороходу Б.А. за научное руководство, а также коллегам Липко И.Ю. и Стаценко А.В., которые помогли ценными замечаниями и комментариями в ходе выполнения исследования и написания статьи.

Литература

1. Альчаков В.В., Кабанов А.А., Крамарь В.А., Карапетьян В.А., Жилияков П.В. система 3D зрения для экспериментального образца подводного робототехнического комплекса. В сборнике: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ. Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции и XI молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Ростов-на-Дону, 2020. С. 361-373.
2. Dubovik S.A., Kabanov A.A., Lipko I.U. Situational Control in Stochastic Systems. Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, 2019. PP. 64-68. – Яз. англ.
3. Скороход Б.А., Жилияков П.В., Стаценко А.В., Фатеев С.И. Алгоритмы построения 3d изображений объектов в задачах подводной робототехники // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4. С. 101-110.
4. Skorohod B.A., Statsenko A.V., Fateev S.I., Zhilyakov P.V. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot, Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. BRISTOL, ENGLAND, 2020. – Яз. англ.
5. Gregoire, M. (2021). Multithreaded Programming with C++. In Professional C++, M. Gregoire (Ed.). – Яз. англ. <https://doi.org/10.1002/9781119695547.ch27>
6. B. Marmalis and M. Perlitis. A Hybrid Parallelization Scheme for Standard Simplex Method based on CPU/GPU Collaboration, Proceedings of the 20th Panhellenic Conference in Informatics, ACM ICPS, 2016, pp. 12. – Яз. англ.
7. Wei Yu, Tsuhan Chen, F. Franchetti, and J.C. Hoe. High performance stereo vision designed for massively data parallel platforms. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, 20(11):1509 –1519, nov. 2010 – Яз. англ..
8. Kaehler A., Bradski G. - Learning OpenCV 3 Computer Vision in C++ with the OpenCV Library. – 2017 – p. 970. – Яз. англ.

References

1. Alchakov V.V., Kabanov A.A., Kramar V.A., Karapetyan V.A., Zhilyakov P.V. 3D vision system for an experimental sample of an underwater robotic complex. In the collection: PERSPECTIVE SYSTEMS AND MANAGEMENT TASKS. Materials of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference and the XI Youth school-seminar "Information management and processing in technical systems". Rostov-on-Don, 2020. pp. 361-373
2. Dubovik S.A., Kabanov A.A., Lipko I.U. Situational Control in Stochastic Systems. Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, 2019. PP. 64-68.
3. Skorokhod B.A., Zhilyakov P.V., Statsenko A.V., Fateev S.I. Algorithms for constructing 3D images of objects in underwater robotics problems // Environmental control systems. 2020. No. 4. pp. 101-110.
4. Skorohod B.A., Statsenko A.V., Fateev S.I., Zhilyakov P.V. Accuracy analysis of 3d points reconstructed from workspace of underwater robot, Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. BRISTOL, ENGLAND, 2020.
5. Gregoire, M. (2021). Multithreaded Programming with C++. In Professional C++, M. Gregoire (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119695547.ch27>
6. B. Marmalis and M. Perlitis. A Hybrid Parallelization Scheme for Standard Simplex Method based on CPU/GPU Collaboration, Proceedings of the 20th Panhellenic Conference in Informatics, ACM ICPS, 2016, pp. 12.
7. Wei Yu, Tsuhan Chen, F. Franchetti, and J.C. Hoe. High performance stereo vision designed for massively data parallel platforms. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, 20(11):1509 –1519, nov. 2010.
8. Kaehler A., Bradski G. - Learning OpenCV 3 Computer Vision in C++ with the OpenCV Library. – 2017 – p. 970. .

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Павел Владимирович Жилияков, аспирант кафедры «Информатика и управление в технических системах», младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Мехатроника и робототехника», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: yanyu@mail.ru

Сергей Игоревич Фатеев, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Мехатроника и робототехника», Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: fateev-si@ya.ru

Pavel V. Zhilyakov, Graduate student of the Department "Informatics and Computer Engineering", junior researcher of Scientific Research Center "Mechatronics and Robotics", Sevastopol State University, 33 Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: yanyu@mail.ru

Sergei I. Fateev, junior researcher of Scientific Research Center "Mechatronics and Robotics", Sevastopol State University, 33 Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: fateev-si@ya.ru

Поступила в редакцию: 21.10.2021

Принята к публикации: 15.11.2021

УДК 519.87:004.94

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.061>

Функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики

А.Л. Боран-Кешишьян¹, e-mail: aumsu.stcw@gmail.com, М.В. Заморёнов², e-mail: zamoryonoff@gmail.com,
П.Н. Флоря³, e-mail: gydra@bk.ru, А.А. Ярошенко¹, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru,
С.И. Кондратьев¹, e-mail: sikondr@gmail.com

¹Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, ²Севастопольский государственный университет, ³13 судоремонтный завод Черноморского флота

Аннотация. В работе рассматривается функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики. Приводится описание функционирования такой системы. При использовании аппарата полумарковских исследований производится построение аналитической модели системы с мгновенно пополняемым резервом времени при учете влияния профилактики на ее производительность. При построении полумарковской модели принимается ограничение на количество профилактик за время восстановления рабочего элемента. Описываются полумарковские состояния исследуемой системы, и приводится граф состояний. Определяются времена пребывания в состояниях системы, вероятности переходов и стационарное распределение вложенной цепи Маркова. Для определения функции распределения времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний с использованием метода траекторий находятся все траектории переходов системы из этого подмножества в подмножество неработоспособных состояний и вероятности их реализации. Определяются времена пребывания системы в найденных траекториях. На основании теоремы полной вероятности определяются функции распределения времен пребывания системы в подмножествах работоспособных и неработоспособных состояний и коэффициент готовности системы. Приводится пример моделирования исследуемой системы. Проводится сравнение полученных результатов с результатами использования теоремы о среднестационарном времени пребывания системы в подмножестве состояний.

Ключевые слова: полумарковская система, вложенная цепь Маркова, метод траекторий, стационарное распределение, функция распределения, коэффициент готовности, вероятность, профилактика.

Functioning of a technical system with an instantly replenished time reserve, taking into account preventive maintenance

Anastas L. Boran-Keshishyan¹, e-mail: aumsu.stcw@gmail.com,
Mikhail V. Zamoryonov² e-mail: zamoryonoff@gmail.com, Pavel N. Florya³, e-mail: gydra@bk.ru,
Alexander A. Yaroshenko¹, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru,
Sergey I. Kondratyev¹, e-mail: sikondr@gmail.com

¹Admiral Ushakov Maritime State University, ²Sevastopol State University, ³13 Ship Repair Plant of the Black Sea Fleet, Russian Federation

Abstract. The work examines the functioning of a technical system with an instantly replenished reserve of time, taking into account prevention. The description of the functioning of such a system is given. When using the apparatus of semi-Markov studies, an analytical model of the system is constructed with an instantly replenished reserve of time, taking into account the effect of prevention on its performance. When constructing a semi-Markov model, a limitation on the number of preventive measures during the restoration of a working element is adopted. The semi-Markov states of the system under study are described, and the state graph is given. The sojourn times in the states of the system, the transition probabilities, and the stationary distribution of the embedded Markov chain are determined. To determine the distribution function of the time spent by the system in a subset of operable states using the trajectory method, all trajectories of the system's transitions from this subset to the subset of inoperable states and the probability of their realization are found. The residence times of the system in the found trajectories are determined. On the basis of the total probability theorem, the distribution functions of the sojourn times of the system in subsets of the healthy and inoperable states and the system availability factor are determined. The modeling example of the system under study is given. The results obtained are compared with the results of using the theorem on the average stationary sojourn time of the system in a subset of states.

Key words: semi-Markov system, embedded Markov chain, trajectory method, stationary distribution, distribution function, availability factor, probability, preventive maintenance.

Введение

Непрерывное усложнение судовых технических средств, диктуемое развитием современных технологий, при неизменной надежности комплектующих элементов, узлов и изделий неизбежно ведет к снижению надежности судовых систем, устройств и судов в целом. Выход из строя основного оборудования в силу специфических условий эксплуатации судов создает аварийную обстановку, а иногда вызывает аварии с тяжелыми

последствиями, включая человеческие жертвы. Морские транспортные суда длительное время находятся вдали от береговых баз и не могут рассчитывать на своевременную помощь судоремонтных предприятий.

Поэтому при недостаточном уровне надежности судового оборудования для обеспечения непрерывного работоспособного состояния судна предусматривают резервирование (дублирование) агрегатов, что еще более усложняет судовое оборудование [1, 2, 3, 4].

В то же время, профилактическое обслуживание [5, 6, 7] позволяет повысить надежность и работоспособность технических систем [8, 9].

1. Постановка задачи

В данной статье предлагается рассмотреть функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики. Необходимо определить функции распределения времен пребывания системы в подмножествах работоспособных и неработоспособных состояний и коэффициент готовности системы.

Рассмотрим функционирование такой системы. Время ее безотказной работы – СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$, время восстановления системы – СВ β_1 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$. В случайные моменты времени (через промежутки времени α_2 с ФР $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$) проводится профилактика, время проведения профилактики – СВ β_2 с ФР $G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$. Профилактика проводится, если момент начала профилактики попал на период работы системы. После проведения профилактики работа системы начинается сначала (рабочие свойства системы полностью обновляются). СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания и дисперсии; у ФР $F_1(t), F_2(t), G_1(t), G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_1(t), g_2(t)$.

Используемый резерв времени представляет собой СВ τ с ФР $R(t) = P(\tau \leq t)$. Отказ системы наступает, когда время восстановления после очередного нарушения ее работоспособности превысит резерв времени τ , или в момент начала выполнения профилактики. Профилактика проводится, если момент ее начала попал на период работы системы. После проведения восстановления или профилактики работоспособность системы полностью восстанавливается.

Для описания функционирования исходной системы введем следующее пространство полумарковских состояний [10, 11, 12, 13]:

$$E = \{S_{210}, S_{132x_1}, S_{230x_2x_3}, S_{221}, S_{102y_1y_2}, S_{200y_3}\},$$

где S_{221} – началась профилактика, работа системы прервана; S_{210} – восстановление или профилактика завершены, работа системы началась сначала; S_{132x_1} – система завершила работу, началось восстановление; используется резерв времени; время, оставшееся до проведения профилактики $x_1 > 0$; $S_{102y_1y_2}$ – резерв времени использован; время, оставшееся до восстановления $y_1 > 0$, до

начала профилактики – $y_2 > 0$; $S_{230x_2x_3}$ – профилактика не проводится, т.к. момент профилактики попал на момент восстановления системы, используется резерв времени, оставшееся до восстановления $x_2 > 0$, до окончания резерва времени $x_3 > 0$; S_{200y_3} – профилактика не проводится, т.к. момент профилактики попал на момент восстановления системы; резерв времени использован; время, оставшееся до окончания восстановления $y_3 > 0$.

При построении модели примем ограничение: в связи с тем, что время восстановления системы во много раз меньше времени наработки на проведение профилактики, то за время восстановления системы событие – наработка на профилактику – может произойти не более 1 раза.

Граф исследуемой системы представлен на рис. 1.

Для данной системы множества работоспособных E_+ и неработоспособных состояний имеют вид:

$$E_+ = \{S_{210}, S_{132x_1}, S_{230x_2x_3}\},$$

$$E_- = \{S_{221}, S_{102y_1y_2}, S_{200y_3}\}.$$

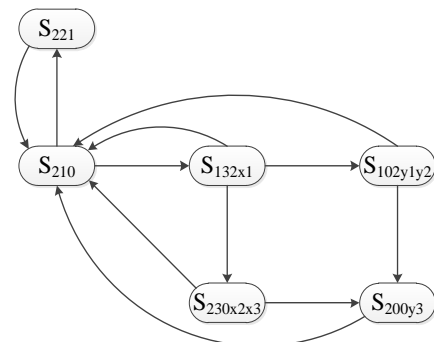


Рис. 1. Граф модели технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики

2. Решение

Определим времена пребывания в состояниях:

$$\theta_{221} = \beta_2$$

$$\theta_{210} = \alpha_1 \wedge \alpha_2$$

$$\theta_{132x_1} = \tau \wedge x_1 \wedge \beta_1$$

$$\theta_{230x_2} = x_2 \wedge x_3$$

$$\theta_{102y_1} = y_1 \wedge y_2$$

$$\theta_{200y_3} = y_3$$

где $x_1 = [\alpha_2 - \alpha_1]^+$; $x_2 = [\beta_1 - x_1]^+$; $x_3 = [\tau - x_1]$; $y_1 = [\beta_1 - \tau]^+$; $y_2 = [\alpha_2 - \tau]^+$;

$$y_3 = \frac{P_{132}^{102}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}} \cdot [y_2 - y_1]^+ + \frac{P_{132}^{230}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}} \cdot [x_2 - x_1]$$

с функциями распределения:

$$\bar{F}_{x_1}(t) = \frac{\int_0^\infty [F_2(t+x) - F_2(x)]f_1(x)dx}{\int_0^\infty [1 - F_2(x)]f_1(x)dx};$$

$$\bar{F}_{x_2}(t) = \frac{\int_0^\infty [G_1(t+x) - G_1(x)]f_{x_1}(x)dx}{\int_0^\infty [1 - G_1(x)]f_{x_1}(x)dx};$$

$$\bar{F}_{x_3}(t) = \frac{\int_0^\infty [R(t+x) - R(x)]f_{x_1}(x)dx}{\int_0^\infty [1 - R(x)]f_{x_1}(x)dx};$$

$$\bar{F}_{y_1}(t) = \frac{\int_0^\infty [G_1(t+x) - G_1(x)]r(x)dx}{\int_0^\infty [1 - G_1(x)]r(x)dx};$$

$$\bar{F}_{y_2}(t) = \frac{\int_0^\infty [F_2(t+x) - F_2(x)]r(x)dx}{\int_0^\infty [1 - F_2(x)]r(x)dx};$$

$$\bar{F}_{y_3}(t) = \frac{P_{132}^{102}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}} \cdot \frac{\int_0^\infty [F_{y_2}(t+x) - F_{y_2}(x)]f_{y_1}(x)dx}{\int_0^\infty [1 - F_{y_2}(x)]f_{y_1}(x)dx} +$$

$$+ \frac{P_{132}^{230}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}} \cdot \frac{\int_0^\infty [F_{x_2}(t+x) - F_{x_2}(x)]f_{x_1}(x)dx}{\int_0^\infty [1 - F_{x_2}(x)]f_{x_1}(x)dx}$$

Запишем функции распределения времен пребывания системы в состояниях:

$$F_{221}(t) = G_2(t)$$

$$\bar{F}_{210}(t) = \bar{F}_1(t) \wedge \bar{F}_2(t)$$

$$\bar{F}_{132}(t) = \bar{R}(t) \wedge \bar{F}_{x_1}(t) \wedge \bar{G}_1(t)$$

$$\bar{F}_{230}(t) = \bar{F}_{x_2}(t) \wedge \bar{F}_{x_3}(t)$$

$$\bar{F}_{102}(t) = \bar{F}_{y_1}(t) \wedge \bar{F}_{y_2}(t)$$

$$\bar{F}_{200}(t) = \bar{F}_{y_3}(t)$$

Найдем вероятности переходов вложенной цепи Маркова:

$$P_{221}^{210} = 1 \quad P_{200}^{210} = 1$$

$$P_{210}^{221} = P\{\alpha_2 < \alpha_1\} = \int_0^\infty f_2(t)\bar{F}_1(t)dt$$

$$P_{210}^{132} = P\{\alpha_1 < \alpha_2\} = \int_0^\infty f_1(t)\bar{F}_2(t)dt$$

$$P_{132}^{210} = P\{\beta_1 < x_1, \beta_1 < \tau\} = \int_0^\infty g_1(t)\bar{F}_{x_1}(t)\bar{R}(t)dt$$

$$P_{132}^{102} = P\{\tau < x_1, \tau < \beta_1\} = \int_0^\infty r(t)\bar{F}_{x_1}(t)\bar{G}_1(t)dt$$

$$P_{132}^{230} = P\{x_1 < \beta_1, x_1 < \tau\} = \int_0^\infty f_{x_1}(t)\bar{R}(t)\bar{G}_1(t)dt$$

$$P_{230}^{210} = P\{x_2 < x_3\} = \int_0^\infty f_{x_2}(t)\bar{F}_{x_3}(t)dt$$

$$P_{230}^{200} = P\{x_3 < x_2\} = \int_0^\infty f_{x_3}(t)\bar{F}_{x_2}(t)dt$$

$$P_{102}^{210} = P\{y_1 < \alpha_2\} = \int_0^\infty f_{y_1}(t)\bar{F}_{y_2}(t)dt$$

$$P_{102}^{200} = P\{y_1 > \alpha_2\} = \int_0^\infty f_{y_2}(t)\bar{F}_{y_1}(t)dt$$

Для получения искомых характеристик необходимо найти стационарное распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ). Для этого требуется составить и решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho_{221} = \rho_{210} * P_{210}^{221} \\ \rho_{210} = \rho_{221} + \rho_{132} * P_{132}^{210} + \rho_{102} * P_{102}^{210} + \\ + \rho_{200} + \rho_{230} * P_{230}^{210} \\ \rho_{132} = \rho_{210} * P_{210}^{132} \\ \rho_{230} = \rho_{132} * P_{132}^{230} \\ \rho_{102} = \rho_{132} * P_{132}^{102} \\ \rho_{200} = \rho_{102} * P_{102}^{200} + \rho_{230} * P_{230}^{200} \end{cases} \quad (1)$$

Для решения данной системы вместо одного из уравнений вводится уравнение нормировки:

$$\rho_{210} + \rho_{221} + \rho_{132} + \rho_{102} + \rho_{200} + \rho_{230} = 1$$

Тогда система (1) примет вид:

$$\begin{cases} \rho_{221} = \rho_{210} * P_{210}^{221} \\ \rho_{210} + \rho_{221} + \rho_{132} + \rho_{102} + \rho_{200} + \rho_{230} = 1 \\ \rho_{132} = \rho_{210} * P_{210}^{132} \\ \rho_{230} = \rho_{132} * P_{132}^{230} \\ \rho_{102} = \rho_{132} * P_{132}^{102} \\ \rho_{200} = \rho_{102} * P_{102}^{200} + \rho_{230} * P_{230}^{200} \end{cases} \quad (2)$$

Решив систему (2) получим:

$$\begin{aligned} \rho_{210} &= \frac{1}{K} \\ \rho_{221} &= \frac{P_{210}^{221}}{K} \\ \rho_{132} &= \frac{P_{210}^{132}}{K} \\ \rho_{230} &= \frac{P_{210}^{132} * P_{132}^{230}}{K} \\ \rho_{102} &= \frac{P_{210}^{132} * P_{132}^{102}}{K} \\ \rho_{200} &= \frac{P_{210}^{132} * P_{132}^{102} * P_{102}^{200} + P_{210}^{132} * P_{132}^{230} * P_{230}^{200}}{K} \end{aligned}$$

где $K = 2 + P_{210}^{132} + P_{210}^{132} P_{132}^{102} P_{102}^{200} + P_{210}^{132} P_{132}^{230} P_{230}^{200}$

Для определения функции распределения времени пребывания системы в подмножестве $E_+ = \{S_{210}, S_{132x_1}, S_{230x_2x_3}\}$ воспользуемся методом траекторий [14].

Определим все траектории перехода системы из E_+ в E_- :

$$\begin{aligned} T_1 &= \{S_{210}\}, \\ T_2 &= \{S_{210} S_{132x_1}\}, \\ T_3 &= \{S_{210} S_{132x_1} S_{230x_2x_3}\}, \\ T_4 &= \{S_{210} S_{132x_1} S_{230x_2x_3} S_{210}\}. \end{aligned}$$

Найдем вероятности реализации каждой из траекторий:

$$\begin{aligned} P_1^T &= P_{210}^{221}; \\ P_2^T &= P_{210}^{132} \cdot \frac{P_{132}^{102}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}}; \\ P_3^T &= P_{210}^{132} \cdot \frac{P_{132}^{230}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}} \cdot P_{230}^{200}; \\ P_4^T &= P_{210}^{132} \cdot \frac{P_{132}^{230}}{P_{132}^{102} + P_{132}^{230}} \cdot P_{230}^{210}. \end{aligned}$$

Определим ФР $\tilde{F}_{210}^0(s)$, $\tilde{F}_{132x}^0(s)$, $\tilde{F}_{230x}^0(s)$ времен пребывания системы в состояниях подмножества $E_+ = \{S_{210}, S_{132x_1}, S_{230x_2x_3}\}$ системы

с учетом повторных попаданий по методу траекторий:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{210}^0(s) &= \frac{\hat{F}_{210}(s)}{c_{210} - (c_{210} - 1)\hat{f}_{210}(s)}; \\ \tilde{F}_{132}^0(s) &= \frac{\hat{F}_{132}(s)}{c_{132x} - (c_{132x} - 1)\hat{f}_{132}(s)}; \\ \tilde{F}_{230}^0(s) &= \frac{\hat{F}_{230}(s)}{c_{230x} - (c_{230x} - 1)\hat{f}_{230}(s)}, \end{aligned}$$

где $\hat{F}_{210}(s)$, $\hat{f}_{210}(s)$, $\hat{F}_{132}(s)$, $\hat{f}_{132}(s)$, $\hat{F}_{230}(s)$, $\hat{f}_{230}(s)$ – изображения по Лапласу функций и плотностей распределения времен пребывания системы в состояниях $S_{210}, S_{132x_1}, S_{230x_2x_3}$,

$$\begin{aligned} c_{210} &= \frac{\rho_{210}}{P_{210}}; \\ c_{132x} &= \frac{\rho_{132}}{\rho_{210} \cdot P_{210}^{221} + \rho_{132} \cdot P_{132}^{102} + \rho_{230} \cdot P_{230}^{200}}; \\ c_{230x} &= \frac{\rho_{230}}{\rho_{210} \cdot P_{210}^{221} + \rho_{132} \cdot P_{132}^{102} + \rho_{230} \cdot P_{230}^{200}}; \end{aligned}$$

где $P_{210} = P_1^T + P_2^T + P_3^T + P_4^T$;

$P_{132} = P_2^T + P_3^T + P_4^T$; $P_{230} = P_3^T + P_4^T$.

С помощью последовательной свертки определим ФР времени пребывания системы в каждой траектории:

$$\begin{aligned} F_1^T(t) &= \tilde{F}_{210}^0(t); \\ F_2^T(t) &= \tilde{F}_{210}^0(t) * \tilde{F}_{132}^0(t); \\ F_3^T(t) &= \tilde{F}_{210}^0(t) * \tilde{F}_{132}^0(t) * \tilde{F}_{230}^0(t); \\ F_4^T(t) &= \tilde{F}_{210}^0(t) * \tilde{F}_{132}^0(t) * \tilde{F}_{230}^0(t), \end{aligned}$$

где * – знак операции свертки.

Отсюда становится возможным определить ФР $F_{\Sigma}^0(t)$ времени пребывания системы в подмножестве E_+ вне зависимости от начального состояния, как взвешенную сумму (смесь) функций распределения времен пребывания системы в подмножестве каждой траектории с коэффициентами равными вероятностям реализации этих траекторий:

$$F_{\Sigma}^0(t) = F_1^T(t) \cdot P_1^T + F_2^T(t) \cdot P_2^T + F_3^T(t) \cdot P_3^T + F_4^T(t) \cdot P_4^T$$

Результаты моделирования по формуле (4) представлены на рис. 2.

Исходными данными для моделирования служат, ФР $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$ и $R(t)$, которые

соответствуют обобщенному закону Эрланга второго порядка. Причем:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1};$$

$$f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1};$$

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1};$$

$$g_2(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1};$$

$$r(t) = \frac{\tau_1 \tau_2 (e^{-\tau_1 t} - e^{-\tau_2 t})}{\tau_2 - \tau_1},$$

где $\lambda_1=0,044$ (ч⁻¹); $\lambda_2=0,133$ (ч⁻¹);

$\mu_1=0,133$ (ч⁻¹); $\mu_2=0,400$ (ч⁻¹);

$\nu_1=0,133$ (ч⁻¹); $\nu_2=0,400$ (ч⁻¹);

$\nu_1=2,666$ (ч⁻¹); $\nu_2=8,000$ (ч⁻¹);

$\tau_1=0,266$ (ч⁻¹); $\tau_2=0,800$ (ч⁻¹).

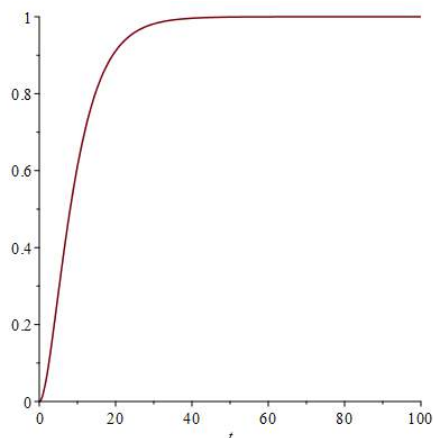


Рис. 2 – Вид ФР времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний.

Сравним значения математического ожидания полученной нами функции $F_{\Sigma}^{\theta}(t)$ и математического ожидания, определяемого с помощью теоремы о среднестационарном времени пребывания системы в подмножестве состояний [10]:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in M_+} m_i \rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_j} \quad (3)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет

9.7842838832 ч.,

тогда как, определяемое по формуле (3) –

9.7842838832 ч.

Очевидно, что результаты совпадают.

Заключение

Проведенное сравнение математических ожиданий времен пребывания в подмножестве работоспособных состояний, полученных на основании найденной в работе функции распределения и на основании теоремы о среднем стационарном времени пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний, показало правильность полученных результатов.

В дальнейших исследованиях планируется применение метода для моделирования более сложных технического обслуживания и профилактики с целью повышения уровне надежности судового оборудования, а также применение построенной модели при оптимизации времен проведения профилактик в исследуемых системах.

Литература

1. Рябинин И. А., Киреев Ю. Н. Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. Л.: «Судостроение», 1997. 264 с.
2. Смирнов О. Р., Юдицкий Ф. Л. Надежность судовых энергетических установок. Л.: «Судостроение», 1974. 280 с.
3. Карпов Л. Н. Надежность и качество судовых дизелей. Л.: «Судостроение», 1975. 232 с.
4. Мельканович С. Ф. Эксплуатационная надежность палубных электроприводов. Экспресс-информация. Серия: «Техническая эксплуатация морского флота». М., 1971. Вып. 89(267).
5. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. М.: «Радио и связь», 1988. 392 с.
6. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие для вузов. М.: «Высшая школа», 1982. 231 с.
7. Глеч С.Г. Определение оптимальных моментов профилактики технологической ячейки с мгновенно пополняемым резервом времени. Сборник научных трудов СИЯЭиП. Севастополь: СИЯЭиП, 2001. Вып.5. с. 187-193.
8. Организация процессов управления. Под общ. ред. Г. Х. Попова. М.: «Экономика», 1975. 279 с.
9. Положение о технической эксплуатации морского флота. М.: «Мортехинформреклама», 1993. 66 с.
10. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: «Наукова думка», 1982. 236 с.
11. Королюк В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: «Наукова думка», 1989. 208 с.
12. Королюк В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления. Кибернетика. 1981. №4. С. 121-124.

13. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения. В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. К.: «Наукова думка», 1976. 181 с.
14. Копп. В.Я. Использование метода траекторий для построения полумарковской модели структуры «технологическая ячейка – накопитель». В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Ю.Е. Обжерин, М.Ю. Ларин. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление №3(247). Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2016. с. 23-34.

References

1. Rjabinin I. A., Kireev Ju. N. Nadezhnost' sudovyh jelektronergeticheskikh sistem i sudovogo jelektroroborudovanija. [Reliability of ship's electric power systems and ship's electrical equipment]. L.: «Sudostroenie», 1997. 264 p.
2. Smirnov O. R., Judickij F. L., Nadezhnost' sudovyh jenergeticheskikh ustanovok. [Reliability of marine power plants]. L.: «Sudostroenie», 1974. 280 p.
3. Karpov L. N. Nadezhnost' i kachestvo sudovyh dizelej. [Reliability and quality of marine diesel engines]. L.: «Sudostroenie», 1975. 232 p.
4. Mel'kanovich S. F. Jekspluacionnaja nadezhnost' palubnyh jelektroprivodov. [Operational reliability of deck electric drives]. Jekspress-informacija. Serija «Tehnicheskaja jekspluacija morskogo flota». M.: 1971. Vyp. 89(267).
5. Bajhel't F., Franken P. Nadezhnost' i tehničeskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod. [Reliability and maintenance. Mathematical approach]. Per. s nem. M.: «Radio i svjaz'», 1988. 392 p.
6. Barzilovich E.Ju. Modeli tehničeskogo obsluzhivaniya slozhnyh system [Maintenance models for complex systems]: Ucheb. posobie dlja vuzov. M.: «Higher school», 1982. 231 p.
7. Glech S.G. Opredelenie optimal'nyh momentov profilaktiki tehnologičeskoi jachejki s mgnovenno popolnjaemym rezervom vremeni. [Determination of optimal moments of prevention of a technological cell with an instantly replenished time reserve]. Sbornik nauchnyh trudov SIJaJeiP. Sevastopol': SIJaJeiP, 2001. Vyp.5. P. 187-193.
8. Organizacija processov upravlenija. [Organization of management processes]. Pod obshh. red. G. X. Popova. M.: «Jekonomika», 1975. 279 p.
9. Polozhenie o tehničeskoi jekspluacii morskogo flota. [Regulations on the technical operation of the marine fleet]. M.: «Mortehinformreklama», 1993. 66 p.
10. Koroljuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovlenija v zadachah nadezhnosti system. [Markov recovery processes in system reliability problems]. Kiev: «Naukova dumka», 1982. 236 p.
11. Koroljuk V.S. Stohasticheskie modeli system. [Stochastic models of systems]. Otv. red. A.F. Turbin. Kiev: «Naukova dumka», 1989. 208 p.
12. Koroljuk V.S. Superpozicija processov markovskogo vosstanovlenija. [Superposition of Markov recovery processes]. Kibernetika. 1981. №4. P. 121-124.
13. Koroljuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozhenija. [Semi-Markov processes and their applications]. V.S. Koroljuk, A.F. Turbin. K.: «Naukova dumka», 1976. 181 p.
14. Kopp V.Ja. Ispol'zovanie metoda traektorij dlja postroenija polumarkovskoj modeli struktury «tehnologičeskaja jachejka – napopitel'». [Using the trajectory method to build a semi-Markov model of the "technological cell – storage" structure]. V.Ja. Kopp, M.V. Zamorjonov, Ju.E. Obzherin, M.Ju. Larin. Nauchno-tehničeskije vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie №3(247). Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2016. P. 23-34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анастас Леонидович Боран-Кешишьян, кандидат технических, доцент, проректор по конвенционной подготовке и филиалам, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93, e-mail: Aumsu.stcw@gmail.com

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph. D. (Eng), Associate Professor, Vice-Rector for Convention Training and Branches, Admiral F. F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, e-mail: Aumsu.stcw@gmail.com

Михаил Вадимович Заморёнов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы» ФГАОУ ВО «СевГУ», 299053, г. Севастополь, ул. университетская, 33. e-mail: zamoryonoff@gmail.com

Mikhail V. Zamoryonov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Information technologies and computer systems, FSAOU VO "SevSU", 33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053. e-mail: zamoryonoff@gmail.com

Павел Николаевич Флоря, директор ФГУП "13 судоремонтный завод Черноморского флота" Министерства Обороны Российской Федерации, 299004, город Севастополь, улица Килен-Балка, e-mail: gydra@bk.ru

Pavel N. Florya, Director of FSUE "13 Ship Repair Plant of the Black Sea Fleet" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Kilen-Balka Street, Sevastopol, 299004 e-mail: gydra@bk.ru

Александр Александрович Ярошенко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальных дисциплин, филиал ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, 299009, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корп. 8/22, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Сергей Иванович Кондратьев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр.Ленина,93, e-mail: zur_mga@nsma.ru

Alexander A. Yaroshenko, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Head of the Department of Fundamental Disciplines, Branch of FSFEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University» in Sevastopol, 299009, 11 Geroev Sevastopolya, buid. 8/22, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Sergey I. Kondratyev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: zur_mga@nsma.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

УДК 622.276

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.082>

Обоснование применения низкоминерализованного заводнения на поздней стадии разработки нефтяного месторождения на шельфе

Д.С. Тананыхин¹, e-mail: tananykhin_ds@pers.spmi.ru, А.Д.Селимов¹, e-mail: selimov_alik@mail.ru,
Л.А. Сайченко¹, e-mail: saychenko_la@pers.spmi.ru
¹Санкт-Петербургский горный университет

Аннотация. Известно, что для поддержания пластового давления используется вода совместимая по своему химическому составу с пластовой. В этом случае обеспечивается возможность сохранить присущую эксплуатируемому объекту поровую структуру. Данная работа посвящена обоснованию применения низкоминерализованного заводнения нефтяных месторождений на поздней стадии разработки. На основе изученного материала разработаны методические рекомендации для повышения эффективности системы поддержания пластового давления за счет закачки низкоминерализованной воды. Результаты теоретического анализа (литературная и патентная проработки) дополнительно были подтверждены проведенным гидродинамическим моделированием низкоминерализованного заводнения на примере нефтяного месторождения.

Ключевые слова: шельф, нефтяное месторождение, низкоминерализованное заводнение, поддержание пластового давления, гидродинамическая модель, пресная вода, проницаемость, набухание глин

A justification of the application of low-mineralized flooding at the later stage of offshore oil field development

Dmitry S. Tananykhin¹, e-mail: tananykhin_ds@pers.spmi.ru, Alik D. Selimov¹, e-mail: selimov_alik@mail.ru,
Liliya A. Saychenko¹, e-mail: saychenko_la@pers.spmi.ru
¹Saint Petersburg Mining University

Abstract It has been known that the water used for reservoir pressure maintenance has to be compatible in its chemical composition with the reservoir water. In this case, it is possible to preserve the pore structure inherent in the exploited object. This article is devoted to the justification of applying low-mineralized water flooding at the later stage of offshore oil field development. Authors developed a method to improve the efficiency of reservoir pressure maintenance system with applying low-mineralized water injection. The novelty of this article is the mathematical determination of the optimal period for the start of the application of low-mineralized water flooding. Theoretical analysis results were also confirmed by hydrodynamic modeling of low-mineralized water flooding in an offshore oil field at a late stage of development. Based on the analysis results, authors identified requirements and recommendations for the low-mineralized water flooding.

Key words: off shore, oil field, low-mineralized flooding, reservoir pressure maintenance system, hydrodynamic modeling, fresh water, permeability, clay swelling.

Introduction

It has been known that the water used for reservoir pressure maintenance has to be compatible in its chemical composition with the reservoir water. In this case, it is possible to preserve the pore structure inherent in the exploited object. Nevertheless, in recent years, fresh (low-mineralized/ low-salinity) waters have been widely used for water flooding of offshore oil fields. At the same time, according to many studies, the effectiveness of low-salinity water flooding is described by the following factors [1, 2, 3, 4, and 5]:

- Physical factors predominant for terrigenous reservoirs are associated with clay swelling. As a result of swelling of clay material, there is a decrease in permeability in the flooded-out region of formation;
- Chemical factors are more important in carbonate reservoirs. These factors are associated with the changes in surface tension and capillary forces, diffusion caused by the appearance of a concentration gradient, and the occurrence of ion exchange.

Over the past few years, researchers have conducted many studies to examine the mechanism of enhancing oil recovery during the injection of low-mineralized water into offshore oil reservoirs.

1. Methodology

Akhmetgareev presented a study of offshore oil field development by using low-salinity water flooding [6]. Core samples from terrigenous and carbonate reservoirs were taken as materials for the experiments. The core samples from the Pervomayskoye and Bastrykskoye fields are terrigenous, and the samples from the Romashkinskoye and Arkhangelskoye fields are carbonate. At these fields, low-mineralized water flooding was carried out into some injection wells. However, the mechanisms for increasing oil recovery were not considered by the authors. An agent used for water flooding was artificially prepared for the experiments following different compositions of reservoir water and fresh water from river Kama. According to test results for terrigenous reservoirs with low-salinity water injection, due to the migration of clay particles, the relative permeability (RP) for the sediments Pervomayskoye and Bastrykskoye fields decreased by 2.6 and 4.8 times, respectively. After performing hydrodynamic modeling, the results showed that the oil recovery when injecting low-salinity water (LSW) for the Pervomayskoye deposits decreased by 3.5%. The author observed that a significant effect could be achieved with a 20% -90% water cut. It can be explained that with water cut of less than 20%, low-salinity water cannot be filtered through the flooded-out zone. The permeability of the oil-

saturated zone decreases, accompanied with a negative effect of the technology. When water the cut exceeds 90%, the efficiency of water flooding with low-salinity water also decreases. It can be attributed to a host of reasons, such as, for example, when the permeating abilities of the reservoir water and low-mineralized water are identical. Nonetheless, the sweep efficiency becomes equal over time. The increase in oil recovery at the Bastryk field was only 0.6%. This result was achieved when the water cut exceeded 45%.

This low increase is due to the initial water saturation being lower than the current one, during water flooding. In addition, the injection was carried out into the perimeter area and, based on this, the impact on the perimeter wells took place while the central part was not involved. The author explained that the lesser effect of the technology when the water cut was less than 45% is due to poor pressure transfer during water flooding with LMW.

Similar results were obtained for carbonate reservoirs through hydrodynamic modeling. The increase in oil recovery amounted to 2.7% and 0.2% for the Romashkinskoye and Arkhangelskoye fields, respectively.

The work [7] showed a method to improve the efficiency of an oil field's production using low-mineralized water flooding at a late stage of field development. Studies of the filtration process were carried out on core materials from the southern Turgai field (Kazakhstan). The effectiveness of the method was determined. Most of the oil was displaced from hydrophobic reservoirs, which contain up to 17% kaolinite. The author concluded that the presence of clay particles in the rock was a prerequisite for the successful application of LMW flooding. In addition, studies had been carried out to assess the effectiveness of this type of water flooding method for samples, saturated with high viscosity oil. In laboratory conditions, up to 19% of the oil was additionally recovered. Nevertheless, the author did not recommend using LMW water flooding at the initial stages of the field development. Furthermore, the use of low-mineralized water based on other enhanced oil recovery methods will lead to a synergetic effect.

Experiments were conducted on the injection of LMW in a Nigerian field. The influence of injected water with high salinity on the displacement coefficient value of LMW flooding method was studied. Brine application was carried out at 150 g / l, seawater at 35.091 g / l, and reservoir water at 396 g / l. The used waters were diluted to half the initial salinity level - up to 5 and 2 g / l. It was shown that if the concentration of NaCl brine decreases from 1.5 to 0.5 g / l, production decreases from 81.34 to 73.22 percent, respectively. The corresponding changes indicate that the concentration of NaCl in the water injected into the reservoir is optimal and is equal to 1.5 g / l. It was also found that after 3 PV filtration; about 78.22% oil recovery is obtained with 1.0 g / l NaCl water injection [8, 9].

With freshwater flooding, since the clay layers become less permeable, there are significant displacement patterns. Such changes might lead to local redistribution of residual reserves [14, 15]. Zadorozhny mentions this point in his paper. When evaluating flooding of clayey interlayer reservoirs with fresh water, the author concluded that during production, horizontal wells (production and injection) with their optimal placement leads to a smaller oil recovery factor

(ORF) than when it comes to producing vertical wells. Yet, the author did not explain the reason for this phenomenon.

When assessing the additional displacement capacity of freshwater for one of the fields in the Perm Territory, an increase in the displacement coefficient of 0.136 on average was established. For this, the cores were artificially aged, then the water cut was modeled by pumping bottom water, and after all these procedures, freshwater flooding took place [11].

On the core materials of the Guneshli field (Azerbaijan), the usage of softened water to enhance oil recovery has been studied [12, 22]. With the secondary displacement by the water of low mineralization, the ORF increases by 21% in the anhydrous period and 12% in the final period.

Despite the existence of a considerable number of works devoted to both studies of mechanisms of the effect of low-mineralized water flooding on the surface-molecular properties of the reservoir system and the oil recovery of terrigenous and carbonate reservoirs, the domestic practice of oil field development does not have a sufficient amount of predominantly practical knowledge on its design [16, 17, 23].

Results

Based on the analysis results, the following requirements and recommendations have been identified for the low-mineralized water flooding of fields at a late stage of field development.

1. Injection of low-mineralized water must be carried out when the water cut of the produced product reaches more than 60%. This will exclude the swelling of clays at the initial stages of development and ensure the ingress of low-mineralized water into the flooded-out zones. As a result, waterflooding will increase the sweep efficiency due to the redistribution of filtration flows [3].

2. It is necessary to choose sources of low-mineralized water with a high content of monovalent ions (Na⁺, K⁺, Cl⁻) since their high concentration increases oil recovery due to better impact in relation to the increase in the double electric layer [4].

3. For carbonate reservoirs, the efficiency of low mineralized water flooding can be controlled by increasing the concentration of SO₄²⁻ ions in the injected water. The use of various types of biocides will avoid the formation of insoluble salts. Furthermore, the additional oil production from the LMW flooding should make up for the costs of applying the method [1].

4. The presence of kaolin-type clays in terrigenous reservoirs should be up to 15%. The high content of clay materials in the rock during low-mineralized water injection can lead to a complete cessation of filtration due to their swelling. In addition, it has been known from earlier studies that clays of the kaolinite type are less prone to swelling and have a reverse hydration character [3, 4, 5, 18].

5. As for the sources of low-mineralized waters, these can be surface ones (rivers, lakes), and if there is a lack of those sources, then it is necessary to ensure the drilling of water wells on freshwater horizons. Electrocoagulation demineralization of wastewater is proposed according to the principle presented in [13, 24] if the reservoir wastewater is sufficient for the organization of waterflooding.

To evaluate the effectiveness of low-mineralized waterflooding at a later stage of field development,

hydrodynamic modeling is recommended through the tNavigator hydrodynamic simulator.

Over the past few decades, well-known hydrodynamic simulators have not been able to fully describe the intermolecular processes occurring during the injection of LMW. Accordingly, after the transition to the injection of low-mineralized water, the change in the relative permeabilities for oil and water was taken into account in the direction of the hydrophilization of the rock. This phenomenon is confirmed by a world modeling experience and modeling the change in permeability due to swelling of clay particles by introducing a special coefficient of permeability reduction [2, 5, 19].

Evaluation of the efficiency of low-mineralized waterflooding at a late stage of field development when modeling LMW flooding by changing the RP curves towards reservoir hydrophilization will take place in several stages:

1. The injection of water, which is compatible with reservoir's (in our case, water with an average salinity of 20 g / l) and the estimation of the final ORF.
2. LMW flooding at the beginning of field development and the final ORF assessment.
3. Carrying out a comparative analysis of the technical indicators of field development during the transition from the injection of reservoir water to low-mineralized water when a certain value of the water cut of the produced fluid is reached.

For these purposes, a hydrodynamic model of two-phase filtration was built using the tNavigator software package (Fig. 1). The model projected 17 wells, of which 9 are producing, and 8 are injection wells. The calculations were made until the water cut reached 98%. All processes occurring in the reservoir system when oil is displaced by the reservoir and low-mineralized water are taken into account in the model due to changes in the relative permeability curves (Fig. 2), constructed according to studies existing in the scientific literature [1, 2, 3, 4, 5, 20, 21].

The first option for the development of this area is the injection of highly mineralized water (salinity 20 g / l) from the beginning of field development. With the implementation of this development system, the cumulative production until the model's calculations was turned off was 280.6 thousand tons. The final ORF is 0.346.

With the injection of low-mineralized water (salinity 2.5 g/l) from the beginning of field development, the cumulative production was 271 thousand tons, which is 3.42 % less than that received by implementing the first development option. This decrease can be explained by the fact that an early transition to waterflooding leads to a decrease in reservoir properties and leads to a decrease in cumulative oil production. The final ORF is 0.334.

Next, various scenarios were simulated to determine the optimal value of water cut during the transition to low-mineralized waterflooding. In this respect, cumulative production values for the water cut of 60%, 80%, and 90% were 307 thousand tons, 310 thousand tons, and 290.5 thousand tons, respectively. Fig. 3 shows maps of initial and residual oil saturation for various waterflooding scenarios. Detailed calculation results are presented in the table. 1.

Table 1

Parameters for the development of a geological and hydrodynamic model during the transition to low-mineralized waterflooding for various values of the water cut of the produced fluids

Water cut during the transition to the injection of LMW, %	Period of reaching the specified water cut, years	Cumulative production, thousand tons	Final ORF
60	26	307	0,378
80	28	310	0,386
90	31	290	0,358

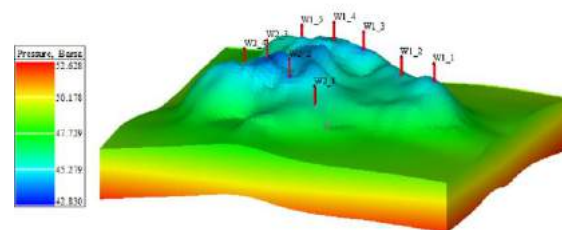


Fig. 1. Geological and hydrodynamic model: 3D-map of the distribution of the initial reservoir pressure by blocks

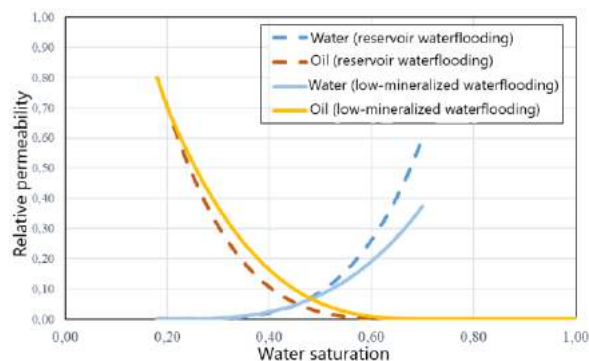


Fig. 2. RP curves used in the model

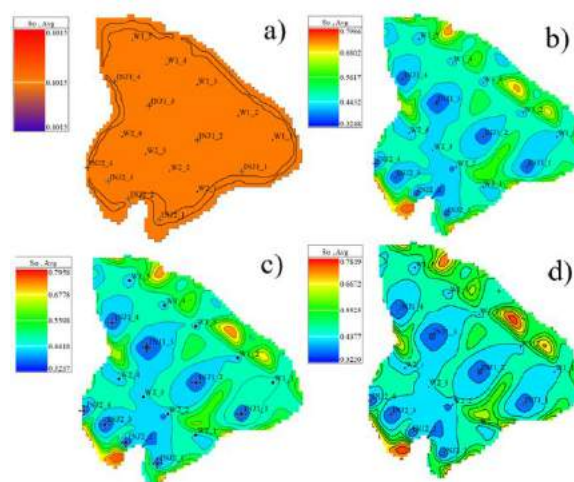


Fig. 3. Map of the initial oil saturation of the development object; b), c), d) residual oil saturation during the transition to the injection of LMW for the value of water cut 60%, 80%, 90%, respectively

After switching to low mineralized waterflooding, a special permeability reduction factor was introduced into the model to simulate the change in permeability due to the swelling of clay particles. To implement this idea, a simple model with layered permeability heterogeneity was built. The average permeability of the first layer is 190 mD, and of the second, 130 mD (Fig. 5).

In the model, 18 wells are drafted, of which 10 are production and 8 are injection wells. The average distance between wells is 1000 meters (Fig. 4). All calculations were performed until all production wells are shut down, i.e., after the water cut of the produced product exceeds 98%.

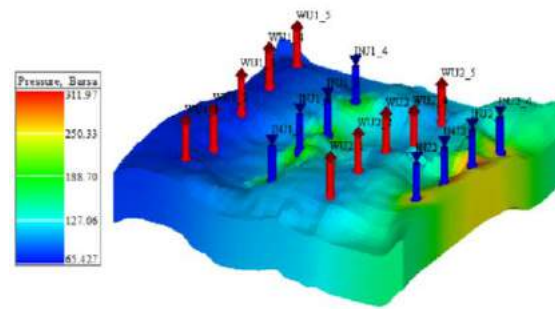


Fig. 4. Geological and hydrodynamic model: 3D-map of the distribution of the initial reservoir pressure by blocks

In the beginning, high- salinity water was injected (salinity 20 g/l). After the water cut reaches 80%, a special permeability reduction factor was introduced into the model to simulate the swelling and migration of clay particles in the flooded-out zone.

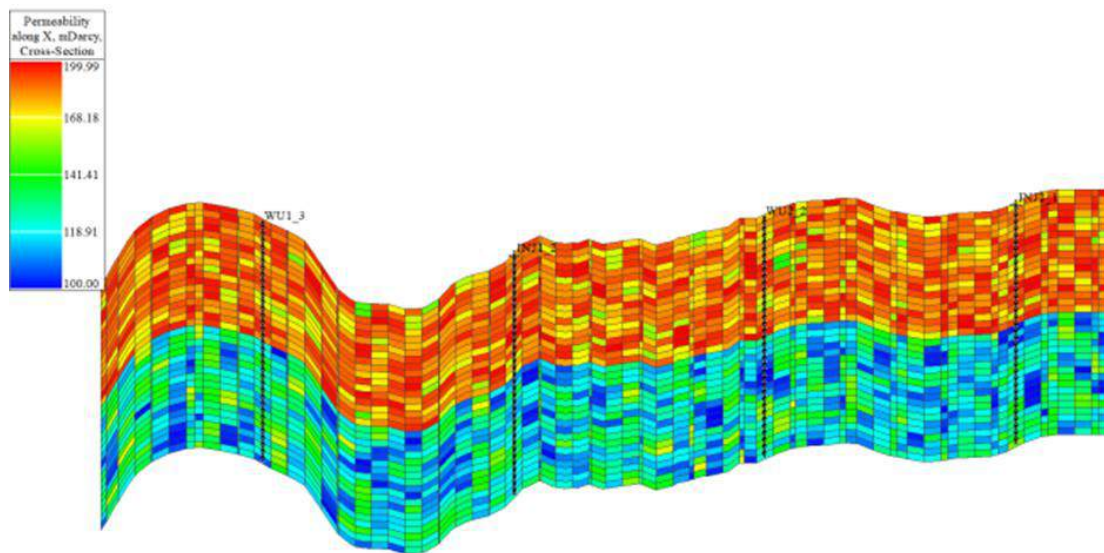


Fig. 5. Section of the Model before using low- mineralized waterflooding: permeability distribution map

According to the results of multiple laboratory studies [6, 7], the permeability was reduced by 1.5 times (Fig. 6). Then the LMW was injected after the injection of highly mineralized water. In this case, additional production was

estimated at 17.7% (8.8 thousand tons). Consequently, we can conclude that the preliminary injection of high-salinity water and the subsequent injection of LMW has a beneficial effect on oil displacement efficiency (Fig. 7).

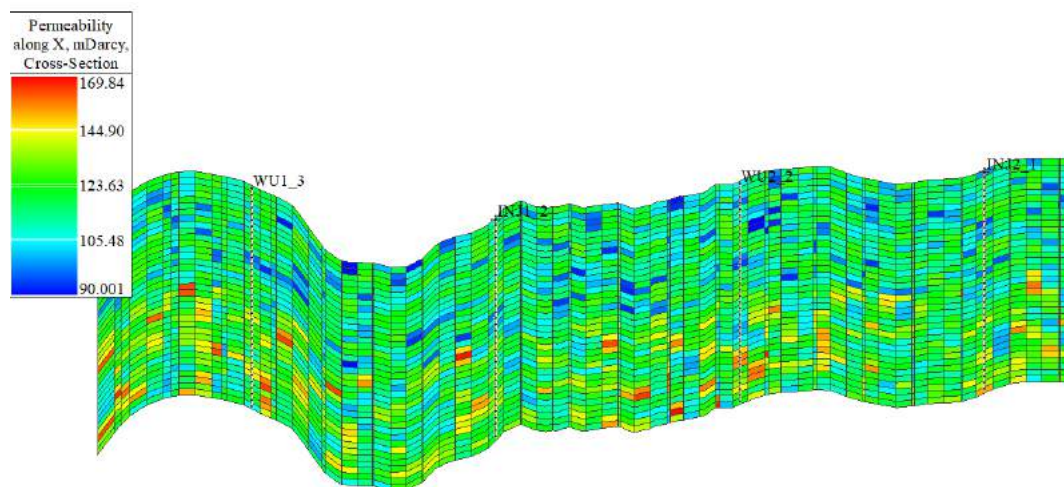


Fig. 6. Section of the Model before using low- mineralized waterflooding: permeability distribution map

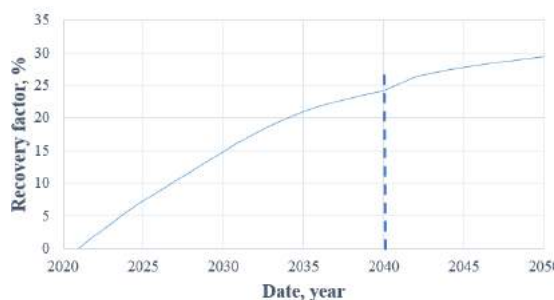


Fig. 7. Change in ORF, % (up to 2040 flooding with high-salinity water, after injection of LMW)

Discussion

Theoretical analysis and hydrodynamic modeling have proven the feasibility of using low-salinity waterflooding for offshore oil fields at a late stage of development. It is possible to determine the optimal period for starting the application of low-mineralized waterflooding (water cut of 80-85%). In addition, it should be noted that in order to maximize the ORF through the injection of LMW, it is advisable to conduct additional laboratory studies for each specific field.

References

1. Experimental and Numerical Modeling of Low-Salinity Waterflood in a Low Permeability Carbonate Reservoir / W. Alameri, T.W. Teklu, R.M. Graves, H. Kazemi, A.M. Al Sumaiti // Paper SPE 174001, SPE Western Regional Meeting, - Garden Grove, - California, - USA, 2015
2. Issledovanie vliyaniya vodrazlichnoy mineralizatsii na koeffitsient vytesneniya neftevodojnoy otzhitel'noy spetsializatsii v sistem podderzhaniiya plastovogo davleniya pogruppe plastov tyumenskoy abalaskoy svit mestorozhdeniy tpp "urajneftegaz" [Investigation of the influence of water mineralization on the oil displacement factor relative to the use in the reservoir pressure maintenance system for the group of formations of the Tyumen and Abalaskaya formations of the Uraineftegaz CCI fields] / A.V. Stenkin, S.V. Astarkin, V.V. Kolpakov, A.G. Davletgareeva // Neftepromyslovedelo, 2019, No. 2, pp. 52-58. DOI:10.30713/0207-2351-2019-2-52-58
3. Akhmetgareev V.V. Rezul'taty modelirovaniya zakachki nizkomineralizovannoy vody v peschanik i izvestnyaki nekotorykh mestorozhdeniy Tatarstana [Results of modeling the injection of low-mineralized water into sandstones and limestones of Tatarstan's reservoirs] / V.V. Akhmetgareev // Oil Economy, 2016, No. 6, pp. 90-93.
4. Turgazinov I.K. Povyshenie effektivnosti razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy nahodyashchihsya na pozdnykh stadiyakh ekspluatatsii s primeneniem nizkomineralizovannogo zavodneniya (na primere mestorozhdeniya uzhnogo Turgaya) [Improving the efficiency of the development of oil fields that are in the late stages of operation with the use of low-mineralized flooding (on the example of the fields of southern Turgay)]: dis. ... Doctor of Philosophy: 6D070800 / Ilyas Kazbekuly Turgazinov. - Almaty, 2018 – 111 p.
5. Chen, Xinxiao, Paprouski, Aminsadegh, Elveny, Marischa, et al. (2021) A laboratory approach to enhance oil recovery factor in a low permeable reservoir by active carbonated water injection. EnergyReports, vol. 7, pp. 3149-3155. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.043
6. Wei, Zhenzhen, Zhu, Shanyu, Dai, Xiaodong, et al. (2021) Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries. EnergyReports, vol. 7, pp. 2751-2758. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.002
7. Fan, Guangli, Li, Meng, Chen, Xinxiao, et al. (2021) Polymer-Nanosilica-assisted to evaluate oil recovery performances in sandstone reservoirs. EnergyReports, vol. 7, pp. 2588-2593. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.04.047
8. Ahmadi, Mohammad Hossein, Alizadeh, S. M., Tananykhin, Dmitry, et al. (2021) Laboratory evaluation of hybrid chemical enhanced oil recovery methods coupled with carbon dioxide. EnergyReports, vol. 7, pp. 960-967. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.02.005
9. Khormali, Azizollah, Petrakov, Dmitry G., NazariMoghaddam, Rasoul. (2017) Study of adsorption/desorption properties of a new scale inhibitor package to prevent calcium carbonate formation during water injection in oil reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 153, pp. 257-267. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.04.008
10. Khormali, Azizollah, Petrakov, Dmitry G., AfshariMoein, Mohammad Javad. (2016) Experimental analysis of calcium carbonate scale formation and inhibition in waterflooding of carbonate reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 147, pp. 843-850. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.09.048
11. Shagiakhmetov, A.M., Raupov, I.R., Terleev, A.V.. (2019) Investigation of selective properties of the gel-forming composition for the limitation of water inflow to carbonate reservoirs conditions. International Journal of Civil Engineering and Technology (discontinued), issue 2, vol. 10, pp. 485-492.
12. Palyanitsina, Aleksandra, Tananykhin, Dmitry, Masoud, Riazi. (2021) Strategy of water-flooding enhancement for low-permeable polymictic reservoirs. Journal of Applied Engineering Science, issue 2, vol. 19, pp. 307-317. DOI: 10.5937/jaes0-29693
13. Rogachev, Mikhail K., Mukhametshin, Vyacheslav V., Kuleshova, Lyubov' S.. (2019) Improving the efficiency of using resource base of liquid hydrocarbons in jurassic deposits of western Siberia. Journal of Mining Institute, vol. 240, pp. 711-715. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.711
14. Dvoynikov, Mikhail V., Kuchin, Vyacheslav N., MintsaeV, Magomed Sh. (2021) Development of viscoelastic systems and technologies for isolating water-bearing horizons with abnormal formation pressures during oil and gas wells drilling. Journal of Mining Institute, issue 1, vol. 247, pp. 57-65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7
15. Prishchepa, O. M., Borovikov, I. S., & Grokhotov, E. I. (2021). Oil and gas content of the understudied part in the northwest of the timan-pechora oil and gas province according to the results of basin modeling. Journal of Mining Institute, 247(1), 66-81. doi:10.31897/PMI.2021.1.8

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Сергеевич Тананыхин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет, 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, 2, e-mail: tananykhin_ds@pers.spmi.ru

Алик Динамудинович Селимов, магистрант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет, 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, 2, e-mail: selimov_alik@mail.ru

Лилия Альбертовна Сайченко, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет, 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, 2, e-mail: saychenko_la@pers.spmi.ru

Dmitry S. Tananykhin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of development and exploration of oil and gas fields, St. Petersburg Mining University, 21st Line, 2, St. Petersburg, 190106, Russian Federation, e-mail: tananykhin_ds@pers.spmi.ru

Alik D. Selimov, Magister of the Department of development and exploration of oil and gas fields, St. Petersburg Mining University, 21st Line, 2, St. Petersburg, 190106, Russian Federation, e-mail: selimov_alik@mail.ru

Liliya A. Saychenko, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of development and exploration of oil and gas fields, St. Petersburg Mining University, 21st Line, 2, St. Petersburg, 190106, Russian Federation, e-mail: saychenko_la@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию: 13.10.2021
Принята к публикации: 16.11.2021



• Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: mit-journal@mail.ru <http://morintex.ru>

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И.

Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А.В., Рыбников Н.И.

Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**