

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
1001000111100110111100101001101110011001010001101010011001100101011000101001001011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010
0000111010100111100010101100100011100110110100100110110110011001010100111001010011001001001100
1100110001110010011000101001010011110101010100000101010100011010111001100100011100101001001010
0010100111001101001111000101001010101110101001000010110001100110010101100010101100110100101001



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



THOMSON REUTERS
WEB OF KNOWLEDGE



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE

№ 4 Часть 1 2023
№ 4 Part 1 2023

Morskie intelektual 'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
0101000110111010010001001110110000101100111010100111010011000101010101010010011001110
1101011000010101110100101001101101010100010110101010010100111010101 101001
100110100110111100110010001100010100111010010101100011010101110101101 101
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 часть 1 2023 Сквозной номер 62

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 (в названии журнала заявлено «морские», т. е. все статьи, в том числе и с интеллектуальной компонентой, должны так или иначе относиться к кораблестроению или, по крайней мере, к исследованиям по морской тематике, что должно быть отражено в статье, аннотации, названии).

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 наук, 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 18000 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.

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

- 2.5.18 Проектирование и конструкция судов;
- 2.5.17 Теория корабля и строительная механика;
- 2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;
- 2.5.20 Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);
- 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы;
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации;
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
- 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- 1.2.2 Математическое моделирование и численные методы.

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, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897,
e-mail: mit-journal@mail.ru

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», 2023



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 1 2023 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), Ulrich's Knowledgebase.

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:

- Design and Construction of Ships,
- Theory of Ship and Structural Mechanics,
- Technology of Ship Building. Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- System Analysis, Information Management and Processing,
- Information-Measuring and Control Systems,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Computer Modeling and Design Automation,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures.

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 № ФЧ77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФЧ72-33245 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, 2023



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

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

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
С.Н. Рюмин, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Члены Редколлегии

В.Г. Бугаев, д.т.н., профессор, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
Е. П. Бураковский, д.т.н., профессор, филиал Военно-морской академии, Калининград
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
В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург
И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург
В.В. Родионов, к.т.н., 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

Председатель

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
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., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, 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, научный руководитель предприятия, 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



ISSN № 2588-0233 (print)
ISSN № 2073-7173 (on line)

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

D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Solomenko Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

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

S.N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

V.G. Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia

Yu.A. Vlasov, PhD (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

I.I. Kostylev, professor, Dr.Sci. (Eng), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

V.V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, 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 Chairmen

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

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

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, 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, Science principal, 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

**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 Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И.Ульянова (Ленина)
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор Дагестанский государственный технический университет
- **Сергей Николаевич Павликов**, кандидат технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Юрий Марсович Искандеров**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук
- **Борис Иванович Руднев**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Валентинович Чехранов**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
- **Борис Аркадьевич Скороход**, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет
- **Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Геннадий Петрович Кича**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Глеб Гендрихович Рогозинский**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде
- **Вячеслав Вячеславович Кожемякин**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Андрей Вартазарович Дологлонян**, кандидат технических наук, Институт природно-технических систем Российской Федерации
- **Александр Львович Кузнецов**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
- **Алина Игоревна Самосюк**, кандидат технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта

- **Илья Евгеньевич Кажекин**, кандидат технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Евгений Петрович Бураковский**, доктор технических наук, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде
- **Юрий Николаевич Уртминцев**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Олег Николаевич Петров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Андреевич Иванченко** доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Сергей Николаевич Хрунков**, доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
- **Сергей Николаевич Рюмин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**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 A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), professor, Dagestan State Technical University
- **Sergej N. Pavlikov**, Ph.D. (Eng), professor, Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University
- **Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
- **Boris I. Rudnev**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Sergei V. Chekhranov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University
- **Boris A. Skorohod**, Dr. Sci. (Eng), professor, Sevastopol State University
- **Victor L. Martynov**, Dr.Sci.(Eng), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Gennadiy P. Kicha**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Gleb G. Rogozinski**, Dr. Sci. (Eng.), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad)
- **Vyacheslav V. Kozhemyakin**, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, State marine technical university of St. Petersburg
- **Andrey V. Dologlonyan**, Ph.D. (Eng), Institute of nature and technical systems
- **Aleksandr L. Kuznetsov**, Dr. Sci. (Eng), Professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Alina I. Samosyuk**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Volga state university of water transport
- **Ilya E. Kazhekin**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Kaliningrad State Technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Evgeny P. Burakovskiy**, Dr. Sci. (Eng), Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad)
- **Yuri N. Urtmintsev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Volga State University of Water Transport

- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Oleg N. Petrov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Alexandr A. Ivanchenko**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Sergey N. Khrunkov**, Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Sergey N. Ryumin**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
Памяти А.И. Гайковича.....	13
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Дергилев В.А., Жук С.С., Аванесова Т.П. Реализация системы фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве.....	16
Назаров А.Г. Особенности проектирования малых пассажирских судов.....	22
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Веревошкин А.В., Юсуп В.М. К вопросу об оценке устойчивости судов на разрушающемся волнении.....	32
Ионов Б.П., Погодин Е.В., Сандаков М.Ю. Имитационное моделирование процесса образования ледовой надделки при движении судна в слое тёртого льда.....	39
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Сюсюка Е.Н., Клименко Е.С., Парфенов В.А., Осипенко И.Р. Моделирование нагрузок и особенности изменения структуры материала стального поршня газового генератора.....	45
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Епихин А.И. Оптимизация параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе метода многокритериальной оптимизации.....	53
Крюков А.А., Чехранов С.В., Влияние относительной высоты рабочих лопаток на эффективность ступени центробежной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.....	58
Герасиди В.В., Лисаченко А.В. К вопросу о качественной и количественной оценки технического состояния элементов системы наддува судовых высокооборотных двигателей в эксплуатации.....	64
Синявский Н.Я., Булычев А.Г. Исследование деградации судовых моторных масел методом ИК-Фурье спектроскопии.....	72
Епихин А.И., Хекерт Е.В. Формирование структуры интеллектуальной системы автоматического управления судовым двигателем.....	79
Митрофанова О.В., Ивлев О.А. Актуальные теплофизические исследования в целях совершенствования судовых ядерных энергетических установок.....	85
Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Федоринов А.В. Влияние эффектов вихреобразования на работоспособность трубных систем парогенераторов судовых ядерных энергетических установок...	95
Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Перспективы утилизации теплоты уходящих газов на судах рыбопромыслового флота.....	103
Руднев Б.И., Повалихина О.В., Горелик Г.Б. Определение скорости рабочего тела в камере сгорания судового дизеля на основе экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра.....	110
Боран-Кешишьян А.Л., Владецкая Е.А., Харченко А.О., Харченко А.А. Повышение эффективности вычислений внешней скоростной характеристики судовых поршневых двигателей на основе моделирования с идентификацией функции Лейдερмана.....	116
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	
Скорород Б.А. Применение закона пропорциональной навигации для наведения автономных подводных аппаратов.....	123
Малыгин И.Г., Коновалов И.Н., Королев О.А. Развитие концепции интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути.....	134
Юхимец Д.А., Белоусов М.Д., Губанков А.С. Разработка информационно-управляющей системы для гибридного необитаемого подводного аппарата на основе платформы ROS2	143
Павин А.М., Ходоренко М.С. Автоматическое выравнивание яркости эхограмм гидролокатора бокового обзора.....	153

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Данцевич И.М., Лютикова М.Н. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации управления телеуправляемыми необитаемыми комплексами.....	161
Захаров В.В., Баранов А.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модели и алгоритмы централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов на основе теории дифференциальных игр.....	171
Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Информационное обеспечение безопасности объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути.....	179
Королева Л.А., Малыгин И.Г. Применение системного подхода для сбалансированной экологической оценки судов на водородном топливе.....	189
Лютикова М.Н., Бузенков, И.И., Халеева Е.П. Совершенствование стабилизации движения судна при качке забортного оборудования.....	197
Тристанов А.Б., Луковенкова О.О., Солодчук А.А. Метод адаптивной пороговой вейвлет-обработки импульсных сигналов.....	205
Огий О.Г., Осипов В.Ю. Нейросетевое прогнозирование трудового потенциала экипажей рыбопромысловых судов.....	214
Лубенцов В.Ф., Лужевский Н.О., Лубенцова Е.В., Лютикова М.Н. Принцип синтеза управляющих воздействий при неизмеряемом возмущении с использованием наблюдателей состояния.....	224
Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Оценка показателей надежности однотипных портовых перегрузочных машин с учетом ординарности и однородности потока отказов в эксплуатационных условиях.....	232
Чусов А.А., Чусова А.Е., Смадыч Н.С. Алгоритмы высокопроизводительной рекуррентной аффинной обработки данных и сигналов и метод улучшения локальности ввода-вывода.....	242

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Кузнецова М.Н., Васильева А.С. Управление проектами в судостроительной отрасли.....	251
Стрельников Д.Д., Стрельникова И.А., Артамонова М.Ю., Колбасин С.С. Определение необходимости эвакуации порожних контейнеров из морского терминала.....	263

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Великанов Н.Л., Наумов В.А. Критерий энергоэффективности при проектировании системы водоснабжения судна.....	271
Ражев А.О., Недоступ А.А. Моделирование поведения рыб в ограниченном пространстве.....	277

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Старжинская Н.В., Чернова А.И. Моделирование и оценка надежности канала связи береговых Центров дистанционного управления морскими автономными надводными судами.....	285
Оськин Д.А., Бочарова В.В., Осипов С.В. Агентный подход к имитационному моделированию движения судна в различных условиях.....	292
Чупина К.В., Ханнанов А.М. Нечеткий регулятор в системе компенсации влияния качки судна на буксируемый подводный объект.....	298
Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Реализация модели многовидовой промысловой системы.....	305
Филатов В.И., Астреин В.В. Разработка модели судна-робота с автоматической выработкой программы движения.....	312

CONTENTS	page
To memory of Aleksandr Gaikovich.....	13
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Viktor A. Dergilev, Sergey S. Zhuk, Tatyana P. Avanesova Implementation of the source data filtering system in the technology of high-precision positioning of the vessel's hull in space.....	16
Albert G. Nazarov Specifics of design of small passenger craft.....	22
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Andrey V. Verevochkin, Vyacheslav M. Yusyp On the issue of assessing the stability of ships on collapsing waves.....	32
Boris P. Ionov, Evgeniy V. Pogodin, Mihail Yu. Sandakov Simulation modeling of the process of ice formation during the movement of a vessel in a layer of grated ice.....	39
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Elena N. Syusyuka, Ekaterina S. Klimenko, Vladislav A. Parfenov, Igor R. Osipenko Modeling of loads and features of changing the structure of the material of the steel piston of a gas generator.....	45
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Aleksey I. Epikhin Optimization of working process parameters of marine engines based on the method of multicriteria optimization.....	53
Aleksey A. Kryukov, Sergei V. Chekhranov The effect of the relative height of the working blades on the efficiency of the inflow turbine with partial blading of the runner.....	58
Viktor V. Gerasidi, Alexey V. Lisahenko On the issue of qualitative and quantitative assessment of the technical condition of the elements of the pressurization system of marine high-speed engines in operation.....	64
Nikolai Ja. Sinyavsky, Alexander G. Bulychev Study of degradation of marine engine oils using Fourier transform infrared spectroscopy.....	72
Aleksey I. Epikhin, Evgeniy V. Khekert Formation of the structure of an intelligent system for automatic control of a marine engine.....	79
Olga V. Mitrofanova, Oleg A. Ivlev Current thermophysical research in order to improve shipboard nuclear power installations.....	85
Olga V. Mitrofanova, Oleg A. Ivlev, Andrey V. Fedorinov The effect of vortex formation on the operability of pipe systems of steam generators of marine nuclear power installations.....	95
Sergei V. Chekhranov, Rafail R. Simashov Prospects for the recycling of the heat of exhaust gases on ships of the fishing fleet.....	103
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina, Gennadiy B. Gorelik Determination of velocity working gas in marine diesel combustion chamber on the base of experimental data from fluctuations of temperature cylinder cap surface.....	110
Anastas L. Boran-Keshishyan, Ekaterina A. Vladetskaya, Alexander O. Kharchenko, Andrey A. Kharchenko Improving the efficiency of calculating the external velocity characteristic of marine piston engines based on modeling with Leiderman function identification.....	116
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS	
Boris A. Skorohod Application of the proportional navigation law for guidance of autonomous underwater vehicles.....	123
Igor G. Malygin, Ivan N. Konovalov, Oleg A. Korolev. Development of the concept of an intelligent system of environmental safety of the Northern Sea Route.....	134
Dmitry A. Yukhimets, Mikhail D. Belousov, Anton S. Gubankov Development of ROS-based information-control system for hybrid unmanned underwater vehicle.....	143
Alexander M. Pavin, Maxim S. Khodorenko Automatic Brightness Equalization of Side-Scan Sonar Echograms.....	153

SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Igor M. Dantsevich, Marina N. Lyutikova Formalization and setting of system analysis, optimization and control of remote-controlled unmanned complexes.....	161
Valerii V. Zakharov, Anton Yu. Baranov, Boris V. Sokolov, Rafael M. Yusupov Models and algorithms for centralized and decentralized scheduling of the application of grouping moving objects based on the theory of differential games.....	171
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov Information security of infrastructure facilities in the Arctic region and the Northern Sea Route.....	179
Lyudmila A. Koroleva, Igor G. Malygin Application of a systematic approach for a balanced environmental assessment of hydrogen-fueled vessels.....	189
Marina N. Lyutikova, Igor I. Buzenkov, Elena P. Khaleeva Improving the stabilization of the movement of the vessel during the pitching of outboard equipment.....	197
Alexander B. Tristanov, Olga O. Lukovenkova, Alexandra A. Solodchuk Method of adaptive threshold wavelet processing of pulse signals.....	205
Oksana G. Ogij, Vasiliy Y. Osipov Neural Network Forecasting of Labor Potential of Fishing Vessel Crews.....	214
Valery F. Lubentsov, Nikita O. Luzhevsky, Elena V. Lubentsova, Marina N. Lyutikova The principle for the synthesis of control actions in an immeasurable disturbance using state observers.....	224
Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov Evaluation of the reliability indicators of the same type of port handling machines, taking into account the ordinary and uniformity of the flow of failures in operational conditions.....	232
Andrey A. Chusov, Alina E. Chusova, Nikita S. Smadych Algorithms for high-performance recurrent affine data and signal processing and a method of improving its input-output locality.....	242

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Marina N. Kuznetsova, Anastasia S. Vasilieva Project management in the shipbuilding industry.....	251
Denis D. Strelnikov, Inessa A. Strelnikova, Maria U. Artamonova, Sergey S. Kolbasin Determination of the need to evacuate empty containers from the sea terminal.....	263

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Nikolay L. Velikanov, Vladimir A. Naumov The criterion of energy efficiency in the design of the ship's water supply system.....	271
Alexey O. Razhev, Alexander A. Nedostup Modeling of fish behavior in a confined space.....	277

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Natalya V. Starzhinskaya, Anna I. Chernova Modeling and assessment of communication channel reliability of the MASS Remote Control Center.....	285
Dmitry A. Oskin, Viktoriya V. Bocharova, Sergey V. Osipov Agent approach to simulation of vessel motion in different conditions.....	292
Kira V. Chupina, Andrey M. Khannanov The fuzzy controller of the ship heave compensation system for the towed underwater vehicle.....	298
Svetlana V. Lisienko, Nina S. Ivanko Implementation of a multispecies fishing system model.....	305
Viktor I. Filatov, Astrein V. Vadim Development of Vessel-Robot's Model with automatic generation of Steering Program.....	312

ГАЙКОВИЧ
Александр Иосифович
01.06.1949 – 11.11.2023



На 75-м году ушёл из жизни Александр Иосифович Гайкович – профессор кафедры Проектирования судов Санкт-Петербургского Государственного Морского Технического Университета, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии Военных Наук, Лауреат премии Ленинградского комсомола, Почетный работник высшего профессионального образования, генеральный директор Научно-исследовательского центра «Морские интеллектуальные технологии», заместитель главного редактора научного журнала «Морские интеллектуальные технологии».

Более 50-ти лет своей жизни, Александр Иосифович, закончив с отличием в 1972 году Морской Технический Университет (ЛКИ) и пройдя аспирантуру, бесменно посвятил педагогической деятельности на кафедре проектирования судов, прошагав все ступени роста, защитив сначала кандидатскую (1977 г.), а затем и докторскую (в 1991 г) диссертации, подготовил и читал дисциплины «Методы оптимизации при проектировании судов», «Проектирование судов»,

«Проектирование боевых кораблей», «Теория проектирования сложных систем», «Основы систем автоматизированного проектирования судов», «Теория принятия решений», «Научно-техническое прогнозирование», «История судостроения». С 1997 года по 2018 Александр Иосифович по совместительству был профессором в Военно-морском инженерном институте (ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского).

Имя Александра Иосифовича, как авторитетного Ученого в области судостроения и кораблестроения, широко известно в профессиональных кругах России. Долгие годы Александр Иосифович являлся Ученым секретарем специализированного совета Морского Технического Университета по защите докторских диссертаций, членом специализированных ученых советов Военно-морского политехнического института, НИИ Кораблестроения и вооружения.

Он – автор более 160 научных работ, посвященных разработке и развитию теории проектирования судов, сложных технических систем, прогнозирования основных характеристик кораблей судов. Среди множества написанных им учебных пособий и монографий ведущее место занимают «Основы теории проектирования сложных технических систем» (2001 г.), и «Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов» 2014 г. в 2-х томах, над которой без соавторов он работал 14 лет. «Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов», без сомнения, является самым фундаментальным научным трудом в области проектирования кораблей и судов.

На кафедре Проектирования судов Морского Технического Университета и в военных институтах им подготовлены 11 кандидатов и 1 доктор технических наук.

Александр Иосифович Гайкович внес значительный вклад в создание системы автоматизирования исследовательского проектирования кораблей САИПР «ЧЕРТЕЖ-4», которая позволила обосновать облик перспективных надводных кораблей.

По инициативе и при активном личном участии Александра Иосифовича Гайковича были проведены 12 международных научных конференций «Морские интеллектуальные технологии» - МОРИНТЕХ-1995 – МОРИНТЕХ -2012.

Александр Иосифович Гайкович с 2008 г. был одним из основателей научного журнала «Морские интеллектуальные технологии», который по праву стал главным журналом для корабельных инженеров страны по широкому спектру научных специальностей и занял высокие позиции в национальных и международных рейтингах.

В 2016 году Александр Иосифович Гайкович был награжден знаком «Почетный работник высшего профессионального образования». От Морского собрания Санкт-Петербурга ему вручен орден «За трудовую доблесть» II-й степени, а также медаль «За заслуги» (2018 г.) – от Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-Морская академия», серебряная медаль А.Н. Крылова (2012 г.), золотая медаль Петра Великого (2006 г.), памятные медали НТО им. акад. А.Н. Крылова: «150 лет академику А.Н. Крылову» (2013), и «150 лет НТО судостроителей им. А.Н. Крылова».

Глубокая эрудиция, принципиальность, любовь к своему делу, лидерские качества, внимание к коллегам и студентам, дружелюбие и весёлый нрав – всё это снискало Александру Иосифовичу большое уважение и любовь со стороны людей, которые его окружали.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 656.61.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.001>

Реализация системы фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве

Дергилев В.А.¹ viktor315464@mail.ru, Жук С.С.¹ serzh.zhuk.99@mail.ru, Аванесова Т.П.¹ avanesova1@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье представлена система фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве для использования в бесплатформенной инерциальной навигационной системе. Цель данного исследования заключается в корректировке исходных данных с последующей стабилизацией технологии высокоточного позиционирования морского судна. Был проведен сравнительный анализ пакетных фильтров с рекурсивным фильтром Калмана, определяющий истинные значения для применения в данной концепции. Отмечено, что высокие результаты отказоустойчивости при наличии внешних помех или при случайном пропадании спутникового сигнала увеличивает точность системы, для работы в автономном режиме. Предлагается следующая методика применения эффективного рекурсивного фильтра в структуре Е-навигации. Результатом данного исследования является нивелирование итоговых погрешностей при исключении нестабильности определённых точностей и потери сигнала с ключевых индикаторов. При применении ряда неполных и зашумленных измерений получена оценка разнovidностей навигационных элементов, описывающих движение корпуса судна.

Ключевые слова: безопасность судоходства, высокоточные системы позиционирования, рекурсивный фильтр, стесненные условия плавания, технические средства определения навигационных параметров движения судна.

Для цитирования: Дергилев А.И., Жук С.С., Аванесова Т.П. Реализация системы фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 16—21. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.001

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.001>

Implementation of the source data filtering system in the technology of high-precision positioning of the vessel's hull in space

Viktor A. Dergilev¹ viktor315464@mail.ru, Sergey S. Zhuk¹ serzh.zhuk.99@mail.ru,

Tatyana P. Avanesova¹ avanesova1@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. This article presents a data filtering system in high-precision positioning technology for the hull of a marine vessel in space, designed for use in a strapdown inertial navigation system. The goal of this research is to correct the raw data with subsequent stabilization of the high-precision positioning technology of the marine vessel. A comparative analysis of batch filters with the recursive Kalman filter was conducted to determine the true values for application in this concept. It is noted that high results in fault tolerance in the presence of external interference or in case of random loss of satellite signals increase the accuracy of the system for autonomous operation. The article proposes a methodology for applying an effective recursive filter within the structure of E-navigation. The result of this research is the leveling of final errors while eliminating the instability of certain accuracies and signal loss from key indicators. When using a series of incomplete and noisy measurements, an estimate of the variations of navigation elements describing the motion of the vessel's hull was obtained.

Keywords: safety of navigation, high-precision positioning systems, recursive filter, restricted sailing conditions, technical means of determining navigation parameters of vessel movement.

For citation: Dergilev V.A., Zhuk S.S., Avanesova T.P. Implementation of the source data filtering system in the technology of high-precision positioning of the vessel's hull in space. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 16—21. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.001

Введение

Сегмент системы высокоточной проводки и швартовки (СВПШ) и носимого лоцманского комплекта (НЛК) автоматизирует процесс лоцманской проводки, швартовки и непрерывного

контроля позиционирования корпуса судна в пространстве для работы с азимутальными буксирами автоматами (АБА).

Принцип работы основывается на технологии двух опорных точек (Т2ОТ), повышающих точность

навигационных элементов, описывающих движение корпуса судна (см. рис.1) [1].

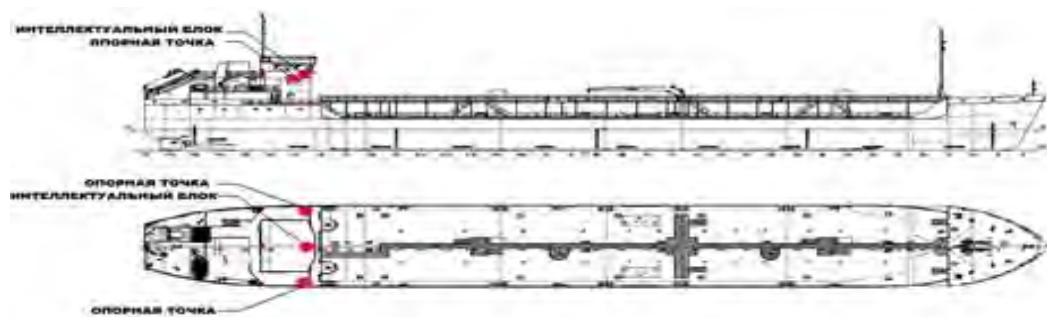


Рис. 1. – Схема расположения элементов НЛК/СВПШ на грузовом судне

Высокая отказоустойчивость при наличии внешних помех или случайном пропадании спутникового сигнала и наличие сразу двух модулей инерциальной навигации вкупе с инновационной

фильтрацией сигнала существенно увеличивает время обеспечения допустимой точности системой, работающей в автономном режиме (см. рис.2).

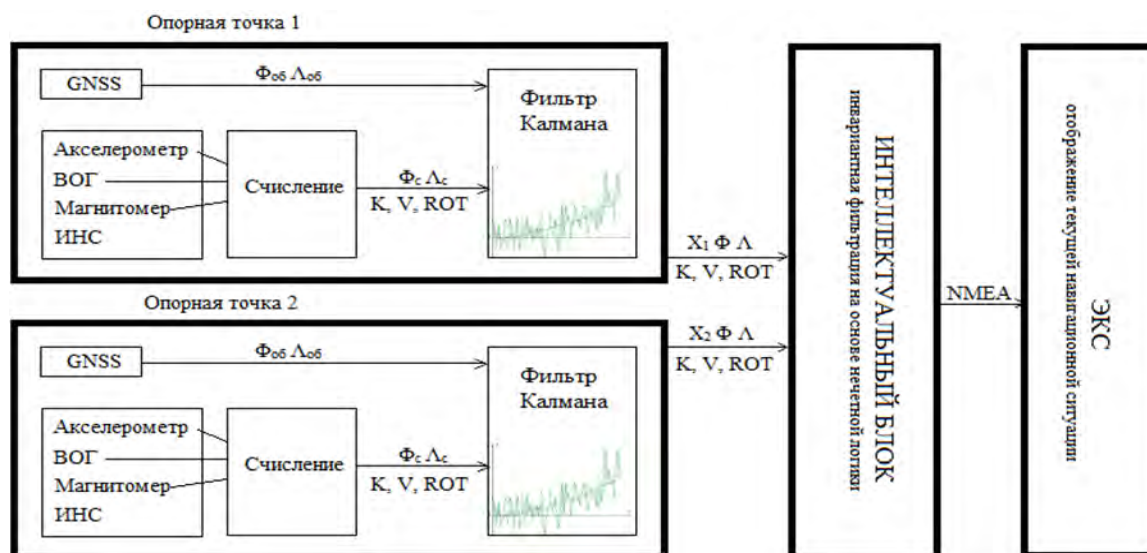


Рис. 2. Блок-схема НЛК/СВПШ

Влияние погрешности инерциальных датчиков на точность определяемых параметров движения управляемого объекта напрямую зависит от результата решения навигационных задач в системе высокоточного позиционирования (СВП). В научных изысканиях определяются погрешности преобразования масштабных коэффициентов и случайных параметров в виде белого шума, - а именно постоянные и блуждающие смещения нулевых сигналов [7]. Основным методом повышения точности позиционирования является минимизация шумов [8], устраняемая на основе организации итерационного процесса. Выбор модели рекурсивного фильтра, используемого для оценки вектора состояния динамической системы, определяет качество оценки и точность фильтрации полученных данных [9-11]. Использование рекурсивного фильтра позволит найти решение задачи на основе метода, позволяющего осуществить многошаговую компенсацию погрешностей исходных данных при априори заданной точности [12-13].

Основная задача в данной работе заключается в определении оптимального алгоритма рекурсивного

фильтра для инерциальной навигационной системы морского надводного судна и его реализация в сегменте носимого лоцманского комплекта и системы высокоточной проводки и швартовке.

Основная часть.

Выбор и реализация рекурсивного фильтра в интеллектуальном блоке инерциальной системы

Реализация проекта рекурсивного фильтра в динамической системе проводится путём вычисления оценки состояния системы на текущий такт работы. Необходима оценка состояния объекта управления, с учетом погрешности, характеризующих это состояние параметров выполнения на каждом этапе их корректировки. Для получения точных данных необходимо сравнение знание истории применения пакетных фильтров. Так, например, выходные сигналы фильтров Калмана и Маджвика, представленные на рис. 3, показывают, что переходной процесс в выходном сигнале фильтра Калмана короче, чем в фильтре Маджвика. Отсюда можно сделать вывод о том, что ошибка фильтрации для первого фильтра значительно меньше, чем для второго. Следовательно, можно

утверждать, что выходные сигналы для фильтра Калмана более эффективны для фильтрации сильно зашумленных сигналов.

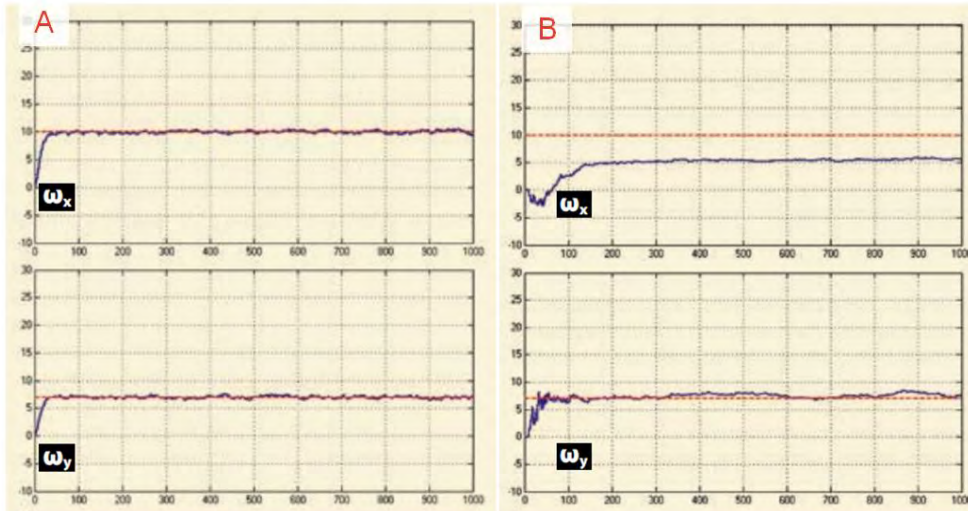


Рис. 3. Выходные сигналы фильтров Калмана (А) и Маджвика (В)

Пакетные фильтры, в свою очередь, требуют знания истории измерений и оценок на текущий момент времени, что в корне отличает их от фильтра рассматриваемой математической модели.

Под записью $\hat{x}_{n|m}$ понимается оценка истинного вектора, $\hat{x}$ в момент n определяющая измерения от начала работы до момента m включительно.

Две переменные определяют состояние фильтра:

$\hat{x}_{k|k}$ и $P_{k|k}$, где первая является апостериорной оценкой состояния вектора объекта до момента времени k включительно. А второе представляет апостериорную ковариационную матрицу ошибок, задающей оценку точности вектора состояния, выявляющей взаимосвязь между параметрами состояния системы.

В основе каждой итерация фильтра Калмана находятся две фазы: экстраполяция (прогноз) и коррекция. Предварительная оценка состояния

системы $\hat{x}_{k|k-1}$ определяется в период экстраполяции по формуле:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (1)$$

где $k-1$ является предыдущим шагом.

Экстраполированный вектор состояния можно представить в виде формулы ковариационная матрицы:

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (2)$$

Таким образом, отклонение ярко выражено в процессе корреляции следующим образом:

$$\hat{Y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (3)$$

Отсюда вектор отклонения (вектор ошибки) ковариационной матрицы:

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (4)$$

Множество коэффициентов усиления в виде матрицы формируется с помощью полученных измерений и отклонений вектора состояния:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (5)$$

Оценки состояния вектора системы получена посредством коррекции экстраполяции вектора:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k Y_k \quad (6)$$

Оценка состояния вектора системы справедлива только при использовании приведённого оптимального вектора коэффициентов [8]. Применяя модель ковариационной матрицы представленной в виде формулы, производим расчёт такого вектора:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (7)$$

В результате исследования определено, что выше указанное выражение, имеет более сложный вид.

Вариация фильтра Калмана для непрерывного времени опирается на динамическую модель состояния непрерывного вида:

$$\dot{x}(t) = F(t) x(t) + B(t) u(t) + w(t)$$

$$w(t) = N(0, Q(t))$$

$$z_k = H_k x_k + v_k, v_k = N(0, R_k) \quad (8)$$

где $x_k = x(t_k)$

Инициализация (определение параметров фильтрации):

$$\hat{x}_{0|0} = E[x(t_0)], P_{0|0} = Var[x(t_0)] \quad (9)$$

Интегрирование инерциальных уравнений с начальным значением предыдущего шага коррекции определяет прогноз и ковариацию:

$$\hat{x}(t) = F(t)\hat{x}(t) + B(t)u(t), \quad (10)$$

где: $\hat{x}(t_{k-1}) = \hat{x}_{k-1|k-1} \Rightarrow \hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}(t_k)$

$$\hat{P}(t) = F(t)P(t) + P(t)F(t)^T + Q(t) \quad (11)$$

где $P(t_k) = P_{k|k-1}$

Следует отметить, используемое уравнение прогноза с непрерывным временем взято из математической модели фильтра Калмана-Бюси [14].

Коррекция:

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T (H_k P_{k|k-1}H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (12)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

Согласно математическим выкладкам была разработана программа, позволяющая фильтровать входящие данные с опорных точек (см. рис.4).

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 Q = 0.00001 # Ковариация шума также можно понимать как отклонение шума между двумя моментами
5 R = 0.1 # Ковариация состояния можно понимать как отклонение состояния между двумя моментами
6 P_k_k1 = 1 # Ковариация состояния в предыдущий момент
7 Kg = 0 # Калман Усиление
8 P_k1_k1 = 1
9 x_k_k1 = 0 # Значение состояния в предыдущий момент
10 ADC_OLD_Value = 0 # Последнее значение АДП
11 kalman_adc_old = 0 # Наилучшая оценка последнего фильтра Калмана
12
13
14 def kalman(ADC_Value):
15     global kalman_adc_old # Определим две глобальные переменные, которые можно напрямую изменять в программе
16     global P_k1_k1
17     Z_k = ADC_Value # Измерения
18
19     if (
20         abs(kalman_adc_old - ADC_Value) >= 80): # Разница между последним значением состояния и измеренным значением в данный момент слишком
21         # велика, выполним простую фильтрацию первого порядка, затем сечение 0618 может быть установлено по желанию
22         x_k1_k1 = ADC_Value * 0.382 + kalman_adc_old * 0.618
23     else: # Разрыв не большой прямого использования
24         x_k1_k1 = kalman_adc_old;
25
26     x_k_k1 = x_k1_k1 # Измерения
27     P_k_k1 = P_k1_k1 + Q # Формула 6б
28     Kg = P_k_k1 / (P_k_k1 + R) # Формула 7в
29
30     kalman_adc = x_k_k1 + Kg * (Z_k - kalman_adc_old) # Рассчитать наилучшую оценку
31     P_k1_k1 = (1 - Kg) * P_k_k1 # Формула 7а
32     P_k_k1 = P_k1_k1 # Обновление ковариации статуса
33
34     ADC_OLD_Value = ADC_Value
35     kalman_adc_old = kalman_adc
36     return kalman_adc
```

Рис. 4. Листинг. Обработка массива данных

Данная программа позволяет фильтровать 23 параметра в реальном масштабе времени. Визуализация обработки данных была реализована

в виде диаграммы зависимостей от времени (см. рис. 5).

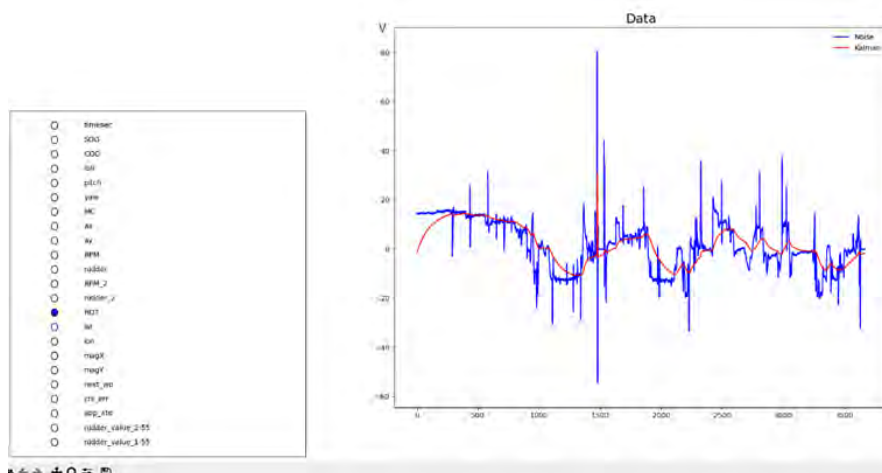


Рис. 5. Схема расположения элементов НЛК/СВПШ на грузовом судне

- Roll – значения угла крена в градусах;
- Pitch – значения угла дифферента в градусах;
- Yaw – значения угла рысканья в градусах;
- HDOP – Horizontal Dilution of Precision, снижение точности получаемых координат местоположения судна в горизонтальной плоскости. В зависимости от значения индикатор «Signal Quality» меняет свой цвет на красный, желтый, синий, что соответствует неудовлетворительному качеству точности, удовлетворительному и отличному;
- LAT – принимаемая широта судна в градусах и минутах – секундах;
- LON – принимаемая долгота судна в градусах и минутах – секундах;
- a_x , a_y , – продольные ускорения по соответствующим осям. При этом ось «x» сонаправлена с продольной осью судна от кормы в бак, ось «y» направлена влево от диаметральной плоскости судна;

- $magX$, $magY$, – составляющие магнитного поля Земли по соответствующим осям.

Заключение

Цель реализации системы фильтрации исходных данных в технологии высокоточного позиционирования корпуса морского судна в пространстве осуществляется методами вариационного подхода результатов исследования. Сглаживание итоговых погрешностей при исключении нестабильности определённых точностей и потери сигнала с ключевых индикаторов, подтверждается точностью полученных результатов навигационных отчетов в опорных точках посредством рекурсивного фильтра в бесплатформенной инерциальной навигационной системе.

Литература

1. Лопатина В.В., Сенченко В.Г. Методика проведения измерений геометрических перемещений подвижного объекта. Морские интеллектуальные технологии № 4 том 4, 2020. 62-65 с.
2. Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления. М.: Наука, 2015. 453 с.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 2007. 309 с.
4. Попов, А. Н. Теоретико-методологические основы интеграции и отображения информации в морской эргатической системе: автореф. дис. доктор тех. наук 05.22.19. Новороссийск, 2021. 30 с.
5. Michael Baldauf, Sun-Bae Hong, Improving and Assessing the Impact of e-Navigation applications, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, Volume 4, 2016, Pages 1-12.
6. Patraiko, D., Wake, P., Weintrit, A., Guan, K., Shi, C., Wu, S., & Seo, J. e-Navigation and the Human Element. *Mar. Navig. Saf. Sea Transp.*, 2009, 4, 29.
7. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. 280 с.
8. Кудрявцева, И. А., Насонова, Л. Р. Применение фильтров частиц для решения задачи оценивания состояния дискретных стохастических систем. In 14-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2015" Тезисы 2015.
9. Стороженко А. В., Попов В. В., Аванесова Т. П. Некоторые вопросы позиционирования судна вследствие потери сигнала навигационной системы. Транспортное дело России, (3), 2016, 105-107 с.
10. Дергилев В. А., Жук С. С., Аванесова Т. П. Анализ экономической целесообразности использования концепции системы автономного судовождения в порту, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, с. 11-16.
11. Данцевич И. И., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов. Морские интеллектуальные технологии. 4-1 (58), 2021, с. 242-250.
12. Данцевич И. И. Адаптивное многослойное управление телеуправляемыми необитаемыми аппаратами. Морские интеллектуальные технологии. 4-1 (54), 2021, с. 147-152.
13. Лютикова М.Н., Бузенков И.И., Халеева Е.П., Малахов С.О. Совмещение систем позиционирования универсальных многоцелевых буксируемых геофизических комплексов с текущей позицией судна-носителя. Морские интеллектуальные технологии. № 1-1 (59), 2023, с. 191-199.
14. Шахтарин, Б. И. "Фильтры Винера и Калмана." М.: Гелиос АРВ 408, 2008.

References

1. Lopatina V.V., Senchenko V.G. Methodology for measuring geometric movements of a moving object. Marine Intelligent Technologies No. 4 Volume 4, 2020. 62-65 c.
2. Krotov V.F., Gurman V.I. Methods and problems of optimal management. M.: Science, 2015. 453 p.
3. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Methods of solving incorrect problems. M.: Science, 2007. 309 p.
4. Popov, A.N. Theoretical and methodological foundations of integration and display of information in the marine ergatic system: author. dis. Doctor of Technical sciences 05.22.19. Novorossiysk, 2021. 30 s.
5. Michael Baldauf, Sun-Bae Hong, Improving and Assessing the Impact of e-Navigation applications, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, Volume 4, 2016, Pages 1-12.
6. Patraiko D. 5e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. CRC Press, 2009. 55–60 p.
7. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. Fundamentals of Building Stencil Inertial Navigation Systems. St. Petersburg: State Research Center of the Russian Federation OJSC Concern TsNII Elektropribor, 2009. 280 p.
8. Kudryavtseva, I. A., Nasonov, L. R. The use of particle filters to solve the problem of assessing the state of discrete stochastic systems. In the 14th International Conference "Aviation and Cos-Monastics-2015" Theses 2015.

9. Storozhenko, A.V., Popov, V.V., Avanesova, T.P. Some issues of vessel positioning due to the loss of the navigation system signal. Transport affairs of Russia, (3), 2016, 105-107 c.
10. Dergilev V. A., Zhuk S. S., Avanesova T. P. Analysis of the economic feasibility of using the concept of an autonomous navigation system in the port, Marine intelligent technologies. 2023. No. 3 part 1, p. 11-16.
11. Dantsevich I.I., Lubentsov V.F. Determination of the parameters of hydrodynamic coefficients in the operating control functions of remote-controlled uninhabited vehicles. Marine Intellectual Technologies. 4-1 (58), 2021, p. 242-250.
12. Dantsevich I.I. Adaptive multilayer control of remote-controlled uninhabited devices. Marine Intelligent Technologies. 4-1 (54), 2021, p. 147-152.
13. Lyutikova M.N., Buzenkov I.I., Khaleeva E.P., Malakhov S.O. Combining the positioning systems of universal multi-purpose towed geophysical systems with the current position of the carrier vessel. Marine Intelligent Technologies. No. 1-1 (59), 2023, p. 191-199.
14. Shakhtarin, B. I. "Wiener and Kalman filters." M.: Helios ARV 408, 2008.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дергилев Виктор Алексеевич, младший научный сотрудник НИЛ «Автоматизация «судовождения», аспирант кафедры «Судовождения», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова»

Viktor A. Dergilev, Junior researcher of the Research Institute "Automation of Navigation", post-graduate student, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93,

Жук Сергей Сергеевич, младший научный сотрудник НИЛ «Автоматизация «судовождения», аспирант кафедры «Судовождения», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова»

Sergey S. Zhuk, Junior researcher of the Research Institute "Automation of Navigation", post-graduate student, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93,

Аванесова Татьяна Панайотовна, доктор педагогических наук, доцент кафедры «Иностранные языки», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: avanesova1@mail.ru

Tatyana P. Avanesova, Doctor in Pedagogical Science, Dr. Sci. (Edu), Associate Professor of "Foreign Languages", Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: avanesova1@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.04.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.09.2023.

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.002>

Особенности проектирования малых пассажирских судов

Назаров А.Г.¹ anmarineconsulting@ya.ru¹АН Марин Консалтинг

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены современные подходы к проектированию малых пассажирских судов, предназначенных как для транспортных перевозок, так и для туризма, вечеринок и прочих видов активностей на борту. Рассмотрены типы этих судов и отмечены их архитектурные особенности. При рассмотрении нормативных подходов к таким судам, отмечено, что большинство из них не нуждается в классе. В тех же случаях, когда судно имеет формальный класс, применяется нотация «легкое судно», выводящего его из-под применения конвенций. Проанализировано формирование компоновки судов с учетом функциональных зон и требований эргономики, эвакуации и перевозки маломобильных категорий граждан. Отмечены проблемы безопасности скоростных судов, предложены габаритные схемы салона. Приводимая экономическая модель эксплуатации судна позволяет оценить коэффициент возврата инвестиций, однако на практике существует большое количество факторов и ограничений, влияющих на выбор размеров, пассажироместимости, скорости других параметров судна. В качестве перспективного проекта приведено описание судна-катамарана, предназначенного для туристического и экскурсионного использования. Выводы к статье содержат рекомендации по созданию отечественной нормативной базы для судов рассматриваемого типа.

Ключевые слова: малые суда, пассажирские суда, проектирование

Для цитирования: Назаров А.Г. Особенности проектирования малых пассажирских судов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 22—31. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.002

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.002>

Specifics of design of small passenger craft

Albert G. Nazarov¹ anmarineconsulting@ya.ru¹AN Marine Consulting, Moscow, Russian Federation

Abstract. This article discusses a modern approach to the design of small passenger craft intended for transport, as well as for tourism, parties and other types of outdoor activities on board. The types of these vessels are considered and their architectural features are noted. When considering regulatory approaches to such vessels, it is noted that most of them do not need a class. In those cases where the craft has a formal class, the notation “light ship” is used, removing it from the application of the convention. The formation of the layout of craft is analyzed taking into account functional areas and the requirements of ergonomics, evacuation and transportation of low-mobility categories of citizens. The safety problems of high-speed vessels are noted, and dimensional layouts of the interior are proposed. The given economic model for the operation of the vessel allows us to estimate the return on investment rate, however, in practice there are a large number of factors and restrictions that influence the choice of size, passenger capacity, speed of other parameters of the vessel. As a perspective project, a description of a catamaran vessel intended for tourist and excursion use is given. The conclusions to the article contain recommendations for the creation of a domestic regulatory framework for vessels of the type in question.

Keywords: small craft, passenger craft, design

For citation: Albert G. Nazarov, Specifics of design of small passenger craft, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 22—31. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.002

Пассажирские суда малых размеров (т.е. суда с длиной корпуса $L_n < 24$ м) составляют значительное число. В курортных регионах малые пассажирские суда (МПС) обслуживают туристические линии и индустрию развлечений, а в отдаленных районах они позволяют решать проблему транспортной доступности.

Как правило, МПС не совершают международных рейсов и имеют ограничения по удалению и пассажироместимости, что позволяет не применять к ним положения конвенции SOLAS в полном объеме. Вследствие этого МПС не всегда в достаточной мере охвачены сертификацией, причем в зависимости от юрисдикции встречаются, как и явно заниженные требования к ним, так и завышенные. Основной проблемой является контроль загрузки судов, что

приводит к высокой аварийности МПС; например, в таких странах как Индия и Бангладеш перегрузка пассажирами составляет до 200...400%.

В РФ, в связи с принятыми Госпрограммами развития транспорта и внутреннего туризма ставятся задачи перевозок по воде, в том числе осуществляемые и на судах малых размеров. Тем не менее, подходящая категории МПС в отечественных нормативных документах отсутствует, равно как отсутствует и научная школа их проектирования.

Под руководством автора в составе КБ AMD и АНМК разработано значительное число проектов, которые могут быть отнесены к МПС и были реализованы в странах юго-восточной Азии (ЮВА), а также в Африке, Австралии и Европе. Создание МПС

описываемых ниже типов требует тщательного функционального анализа, а используемые проектные решения не всегда очевидны, поэтому представленный в предлагаемой статье опыт проектирования таких МПС несомненно полезен российским разработчикам. В настоящей статье автором поставлены задачи анализа основных типов МПС и особенностей их компоновки, предложены подходы к проектированию и пути совершенствования отечественных нормативных документов.

Типы малых пассажирских судов

Формально, любое судно, перевозящее более 12 пассажиров, является пассажирским с точки зрения законодательства. Однако на практике, существует множество моделей использования МПС, что приводит к формированию различных их архитектурных и функциональных типов, и различных требований к ним.



Рис. 1 – Пассажирский катамаран «транспортёр» пр. CNC18E с электродвижением



Рис. 2 – Распространенный вид «транспортёра» в странах ЮВА – «спидбот»

Из опыта автора, среди МПС могут быть выделены различные группы судов. Так, «транспортёры» (рис.1) осуществляют перевозку пассажиров из пункта А в Б, по маршруту и расписанию. Обычно для таких судов характерно размещение пассажиров в салоне. Внутри этой группы судов существуют высокоскоростные суда, суда для перевозки пассажиров и нескольких единиц колесной техники, «речные трамвайчики» и т.д. В странах ЮВА получили распространение «спидботы» (рис.2) – катера для перевозки 20...80 пассажиров, имеющие скорости движения по маршруту 30узлов.

Водные такси ориентированы в первую очередь на перевозку по найму, с небольшим количеством пассажиров. Строго говоря, не все из них являются пассажирскими, т.к. перевозят не более 12 человек.



Рис. 3 – Катамараны тур-боты пр. AT1500

Для тур-ботов (tour boats) (рис.3) характерна перевозка в сочетании с другими видами активности (экскурсии, купание, пикник и т.д.). Так, на них устанавливаются бортовые аттракционы (водные горки, каяки и т.д.), места для приема пищи, загорания и т.д. Обычно такие суда совершают рейсы продолжительностью более четырех часов с остановками в живописных локациях. Среди черт таких судов «мокрый» бар и санузел, которыми могут воспользоваться люди после купания, а также купальные трапы и приспособления для перевозки аттракционов.

Пати-боты (party boats) (рис.4) представляют собой суда для «вечеринок» на борту. Обычно это суда открытого типа или с просторными общественными помещениями/палубами. В отличие от предыдущей группы судов, они приспособлены для организации мероприятий и торжеств, и как правило совершают лишь короткие переходы. Стиль отделки подобных судов зачастую отличается «яхтенным» качеством.

Назначением банкетных судов (dining boats) является организация питания и торжеств на борту.

Дайв-боты (рис.5) предназначены для перевозки рекреационных дайверов и обеспечение легкоподъемных спусков. Судно для проживания дайверов (liveaboard) служит для многодневных дайв-туров и подразумевает размещение в каютах на борту.

К судам для экологического туризма относятся, например, суда с прозрачным днищем (glass bottom boats) (рис.6); наблюдения за китами (whale-watch boats), полупогружные «субмарины» и т.д.

В определенной степени к пассажирским могут быть отнесены частные и корпоративные прогулочные суда, используемые для коммерческой перевозки и чартера. В [1] показано, что по действующим в ЕС правилам к рекреационным судам на борту может находиться 30 и более человек, при этом все люди на борту считаются «экипажем», что позволяет формально вывести их из-под действия требований к пассажирским судам. Однако в целом подобная «лазейка» не должна подменять разумные дополнительные требования при коммерческой эксплуатации таких судов.



Рис. 4 – Пату-бот пр. MTV1100

Хаусботы и бот-хаусы – суда для проживания на борту; во втором случае судно обладает базовыми мореходными качествами для плаваний выходного дня.

Проблемы нормативных подходов

Проблемы классификации судов малых размерений подробно рассмотрены автором в [1]. Наиболее доступная ниша «маломерное коммерческое судно» в РФ ограничена 12 человеками на борту при 20м длины, что провоцирует эксплуатацию судов с превышением вместимости. С другой стороны, прогулочное судно согласно ФЗ-36 ограничено 18 человеками на борту, что также далеко от реальности. Перспективная

ниша «пассажирских яхт» (до 36 пассажиров на борту) недавно введенная РМРС [2] с приближенными к реальности требованиями, к сожалению, доступна лишь для судов длиной более 24м.

Опыт показывает, что в зарубежных юрисдикциях МПС чаще всего не требуют классификации и должны соответствовать национальным стандартам, например МСА [3], NSCV [4] и подобным, с различным объемом требований. Если же классификация требуется, то зарубежные классификационные общества (КО) используют нотацию «легкое судно», применяемую не только к высокоскоростным судам, но и вообще к судам легкой конструкции (табл.1), подразумевающие упрощенные требования и выводящей МПС из-под действия конвенций. Аналогичная нотация появилась в 2023 и в правилах РС [2], однако ее наполнение и применимость пока не прописаны.



Рис. 5 – Катамаран пр. AT1600 для перевозки дайверов. Предусмотрены спуск к воде в кормовой части и специальные сиденья, позволяющие устанавливать акваланги.

Таблица 1

Критерии высокоскоростного и легкого судна

Правила и нотация	Критерий
РМРС, HSC Code высокоскоростное	$V \geq 7.16\Delta^{0.1667}$
Корейский регистр KR, высокоскоростное судно	$V \geq 7.16\Delta^{0.1667}$ или 25уз
Индийский регистр IRS, легкое судно	$V \geq 4.8\Delta^{1/6}$
DNV, KR легкое судно	$\Delta \leq (0.13LB)^{1.5}$
Регистр Ллойда LR, судно легкого водоизмещения	$\Delta \leq 0.04(LB)^{1.5}$
РКО, скоростное судно	$\geq 30\text{км/ч}$

где – V – скорость, уз, Δ – водоизмещение; L , B – длина и ширина судна

В практике РФ, наиболее жесткими являются требования к конструктивной противопожарной защиты, которые серьезно ограничивают

применяемые материалы и компоновку, делая конструктивные решения малопригодными для МСП. В частности, в РФ ограничивается применение композиционных материалов [5].

Учитывая актуальность развития нормативной базы РФ для МПС, в настоящей статье рассмотрены австралийский стандарт NSCV [4] и финский VTT [6]. Причем, если первый представляет собой попытку упрощения норм для «крупных» судов, то второй – это, наоборот, переход от стандартов ISO для прогулочных судов - к коммерческим.

Обоснование динамических схем МПС

В практике РФ обоснование динамических схем МПС зачастую носит характер предпочтений принимающих решение лиц. Так, своеобразная историческая приверженность судам на подводных крыльях длительное время «задавливала» преимущества судов других типов. Более того, до последнего времени муссировалась идея создания пассажирских экранопланов, несмотря на ограничения в пассажировместимости и целый комплекс организационных трудностей эксплуатации.

Таблица 2

Сравнение применимости различных видов судов в качестве МПС

Оцениваемое качество	Значимость f_i	Однокорпусное	Катамаран	СВП	СПК	Экраноплан
Строительная стоимость	1	5	4	2	2	1
Эффективность по топливу	1	5	5	3	5	4
Мореходность, ускорения	1	4	5	2	4	2
Комфорт, использование пространства	1	3	5	3	3	1
Простота обслуживания	1	5	5	3	3	2
Сложность эксплуатации	1	5	5	3	4	1
Ограничения осадка	1	4	3	5	2	5
Безопасность	1	5	5	5	4	2
Амфибийные/ледовые качества	1	1	1	5	1	3
Общая оценка R		3 7	3 8	3 1	2 8	2 1

Для оценки применимости различных схем судов в качестве МПС может быть использована табл.2. Общая оценка R динамической схемы МПС получается как сумма получаемых экспертной оценкой баллов от f_i (1 до 5), умноженных на значимость - весовой коэффициент f_i :

$$R = \sum_{i=1}^n r_i f_i$$

Приведенная процедура может быть использована для объективного обоснования типа МПС. Из опыта автора более чем в 60% случаев наилучшей схемой будет судно катамаранного типа, что подтверждается статистикой построенных судов.

Часто возникает дискуссия о допустимости применения подвесных моторов (ПМ) для МПС. Привлекательность бензиновых ПМ заключается в их низкой стоимости (примерно вдвое по сравнению с дизельным двигателем аналогичной мощности) и простоте установке и обслуживании. Очевидно, такого применения не избежать, если речь идет о судах для «приключенческого» туризма. Применение ПМ должно быть ограничено пассажироместимостью и/или размером судна: так, во Вьетнаме допускается установка ПМ на МПС длиной до 12м.



Рис. 6 – Судно со стеклянным днищем пр.МGB10. Виден колодец, позволяющий сохранить плавучесть судна в случае повреждения стекла.

Компоновка судов

Компоновка МПС является определяющей для обоснования их размеров, и как правило уже на начальных этапах проектирования требуется эскизирование общего расположения. При малых размерах судна его размеры меняются дискретно, из-за шага сидений, ширины проходов и т.д. [7].

Для МПС типа «транспортёр» размеры пассажирского салона могут быть определены с использованием приводимых ниже зависимостей. Для МПС других типов определение размеров помещений возможно лишь при эскизировании планировки палуб и помещений, необходим учет функциональных зон, отводимых для хранения оборудования, переоборудования, бара илистройки сервировки блюд, приема пищи, фотосессий и т.д. (рис.7). Подобные решения практически невозможно представить в аналитическом виде.

Площадь салона A_s в первом приближении может быть оценена исходя из удельной площади на одного пассажира a_p , m^2 :

$$A_s = a_p n_p$$

где n_p - число пассажиров. Величины a_p оцениваются либо из опыта проектировщика, либо из требований нормативных документов. Так, минимальные величины n_p могут быть определены по австралийскому стандарту NSCV [4], где наименьшее значение $0,4m^2$ - для судов внутреннего плавания категории Е при продолжительности рейса менее 2ч; $0,85m^2$ - для морских и прибрежных районов плавания А, В, С при продолжительности рейса более 2ч. Заметим, что при использовании этих величин из NSCV в РФ следует учесть фактор наличия верхней одежды, что несколько увеличивает необходимые размеры; из опыта автора не менее $0,5...0,9m^2$, где большие значения соответствуют более комфортному размещению.

Ширина B_s и длина L_s салона могут быть определены как, м:

$$B_s = n_s b_s + n_w b_w + 2b_m$$

$$L_s = (n_R - 1)p_s + (1.2...1.3)p_s$$

где n_s - число сидений в ряду; b_s - ширина сиденья, м; n_w - число проходов, b_w - ширина прохода, м; b_m - запас на ширину конструкции и зазоры, обычно 3...5% ширины судна; n_R - число рядов; p_s - шаг сидений, м. Минимальная ширина и шаг сидений по NSCV составляют 475 и 750мм, по VTT - 500мм и 750мм соответственно. Минимальная ширина проходов между сиденьями дифференцированно зависит от числа сидений, которые он обслуживает и от длины самого прохода; при $n_p < 18$ по NSCV допускается 510мм, $n_p = 18...72$ - 600мм и при большем числе пассажиров - 750мм; по VTT ширина проходов 800мм для групп сидений более четырех. Автором статьи из опыта обобщены и предлагаются значения, приведенные на рис.10.

Приведенные выше зависимости получены в предположении, что все пассажиры обеспечены сидячими местами, что справедливо для высокоскоростных судов во избежание травматизма. Однако, на коротких рейсах по NSCV допускается не обеспечивать всех сидениями: при продолжительности рейса менее 15...60 минут допускается всего 40...75% сидячих мест в зависимости от категории судна. По VTT [6], сиденьями должны быть обеспечены все пассажиры.

Для оценки эффективности использования площадей судна автором используется соотношение площади салона к общей площади горизонтальной проекции судна A_s/A . Так, для пассажирских СПК $A_s/A=0,4$, для пассажирских катамаранов близкой длины $A_s/A=0,7$. При этом, на сравниваемом СПК $a_p=0,5m^2$, а на катамаране $a_p=1,0m^2$, что говорит о более комфортном размещении пассажиров на катамаранах.

При разработке компоновки следует учесть обеспеченность пассажиров санузлами; действующие в РФ санитарные правила не устанавливают их количество. В VTT [6] устанавливается один санузел на каждые неполные

50 пассажиров салоне, а в NSCV [4] предлагают более гибкие подходы в зависимости от длительности рейса. Если с борта МПС тур-бота предполагается купание, то количество санузлов необходимо увеличить вдвое от указанных выше, т.к. они используются для переодевания.

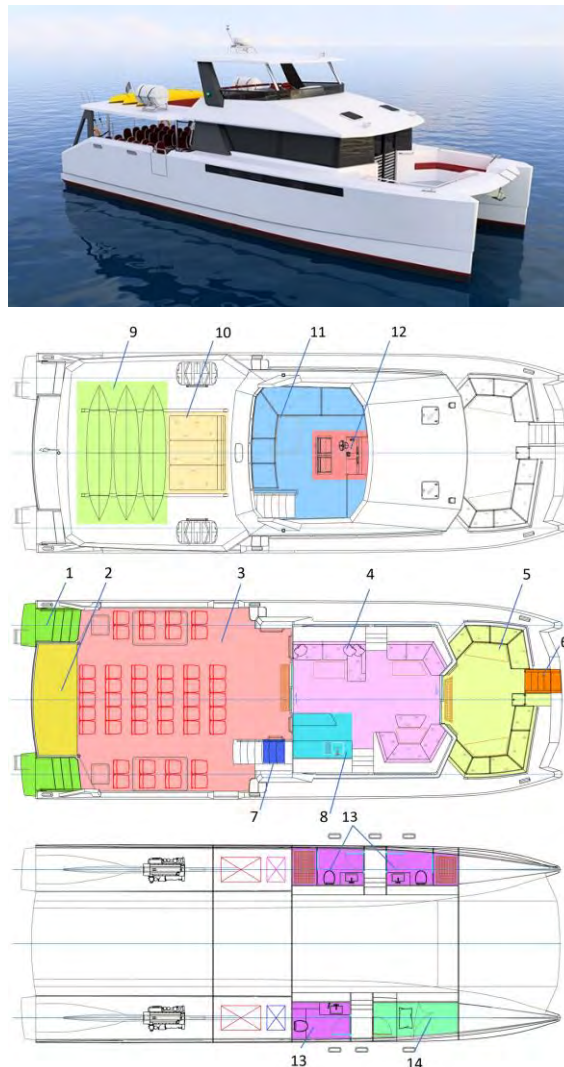


Рис. 7 - Компоновка функциональных зон катамарана тур-бота пр. RC17: 1 – купальная платформа, 2 – платформа для фотосессий; 3 – сиденья под навесом; 4 – кондиционированный салон; 5 – носовой кокпит; 6 – носовая аппарель; 7 – «мокрый» санузел; 8 – барная зона; 9 – места хранения аттракционов; 10 – палуба для загорания; 11 – флайбридж; 12 – пост управления; 13 – санузел; 14 – каюта экипажа.

Перевозка маломобильных групп

При оценке компоновки судна следует учитывать возможность перевозки маломобильных групп населения (МГН), в частности – в инвалидных колясках. В РФ, РКО [8] разработало соответствующий раздел правил, который в целом работоспособен, но нуждается в уточнении некоторых размеров. Заметим, что на сегодняшний день в РФ уровень адаптации водного транспорта к нуждам МГН самый низкий из всех видов транспорта (что связано также с адаптацией объектов

инфраструктуры); вопросы перевозки МГН требуют особого внимания проектировщиков МПС.

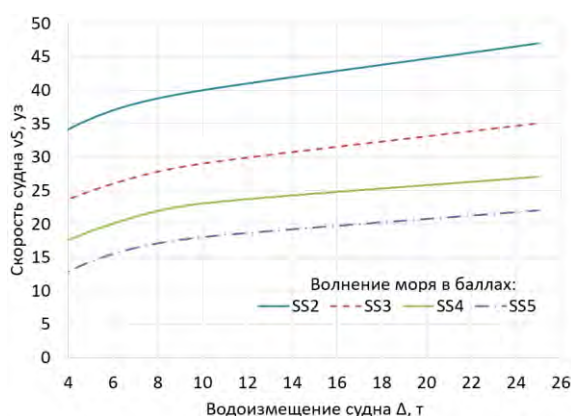


Рис. 8 – Обоснование размеров катамарана МПС по критерию комфорта пассажиров при коротком рейсе (до 2ч).



Рис. 9 – Опасная и безопасная компоновка «спидбота»; внизу – последствия столкновения

Австралийские NSCV [4] требуют наличия места для МГН на пассажирских паромах вместимостью $n_p > 36$ прочих пассажирских судах $n_p > 100$; эти требования не применяются к судам «приключенческого» характера эксплуатации. Для первых 37 пассажиров требуется 2 места для МГН, и сверх этого – еще одно место на каждые 50 человек. Ширина проходов принимается не менее 850мм, а размер палубы для размещения МГН – 800х1300мм, и как минимум один санузел должен быть приспособлен для МГН.

Пути эвакуации

Подход российских нормативных документов к путям эвакуации на пассажирских судах не дифференцирован в зависимости от размеров, категории и пассажировместимости судна, что вызывает сложности при разработке МПС.

Наиболее подробные и рациональные требования к эвакуации МПС могут быть почерпнуты из австралийских NSCV [4], где пути эвакуации разделены на пути высокой и низкой производительности. К последним относятся узкие проходы (650мм), горизонтальные люки, открывающиеся и выбиваемые стекла, трапы и т.д. В зависимости от количества пассажиров на борту предписывается иметь определенное количество путей эвакуации, например при пассажировместимости от 18 до 72 человек необходимо либо два пути высокой производительности, либо один путь высокой производительности и один путь низкой производительности на каждые 18 человек.

Связь размеров судна и компоновки с безопасностью

Автором показано [9,10], что безопасность людей на МПС зависит в значительной степени от компоновки судна. Несмотря на наличие нормативов, попытка применять HSC Code к компоновке МПС не всегда приводит к необходимому результату, поскольку, во-первых, не все требования соответствующего раздела физически применимы к судам малых размеров, а во-вторых, даже довольно тихоходные МПС (скажем, со скоростями 10...12уз) в силу сравнительно легкого водоизмещения оказываются на Уровне 2 [11] требований к компоновке.

В силу малого размера судна, одной из наиболее острых проблем МПС является комфорт пассажиров по ускорениям при движении на волнении. На практике оказывается, что при малой заданной пассажировместимости и одновременной необходимости двигаться с высокой скоростью размер судна определяется уже не компоновочными решениями, а необходимостью обеспечить приемлемый уровень вертикальных ускорений. Автором разработана диаграмма (рис.8), позволяющая в первом приближении обосновать водоизмещение судна катамаранного типа в зависимости от его скорости и силы волнения. Диаграмма построена путем обобщения экспериментальных данных по хорошо зарекомендовавшим себя судам с результатами серии расчетов вертикальных ускорений. На стадии концептуального проектирования, обосновать размер судна по этому критерию возможно с использованием параметрического метода [13].

Помимо комфорта, вертикальные ускорения определяют также возможность травм при движении; подобные случаи описаны в [10].

Еще одним фактором, непосредственно влияющим на безопасность людей на борту МПС являются ускорения при столкновении. Практика показывает, что в насыщенных малыми судами акваториях столкновения происходят с удручающей регулярностью [9]. Так, на рис.9 показаны последствия столкновения «спидботов» у побережья острова Пхукет в начале 2020; результатом столкновения явились травмы 20 человек и гибель двух детей, находившихся в момент удара в носовой оконечности.

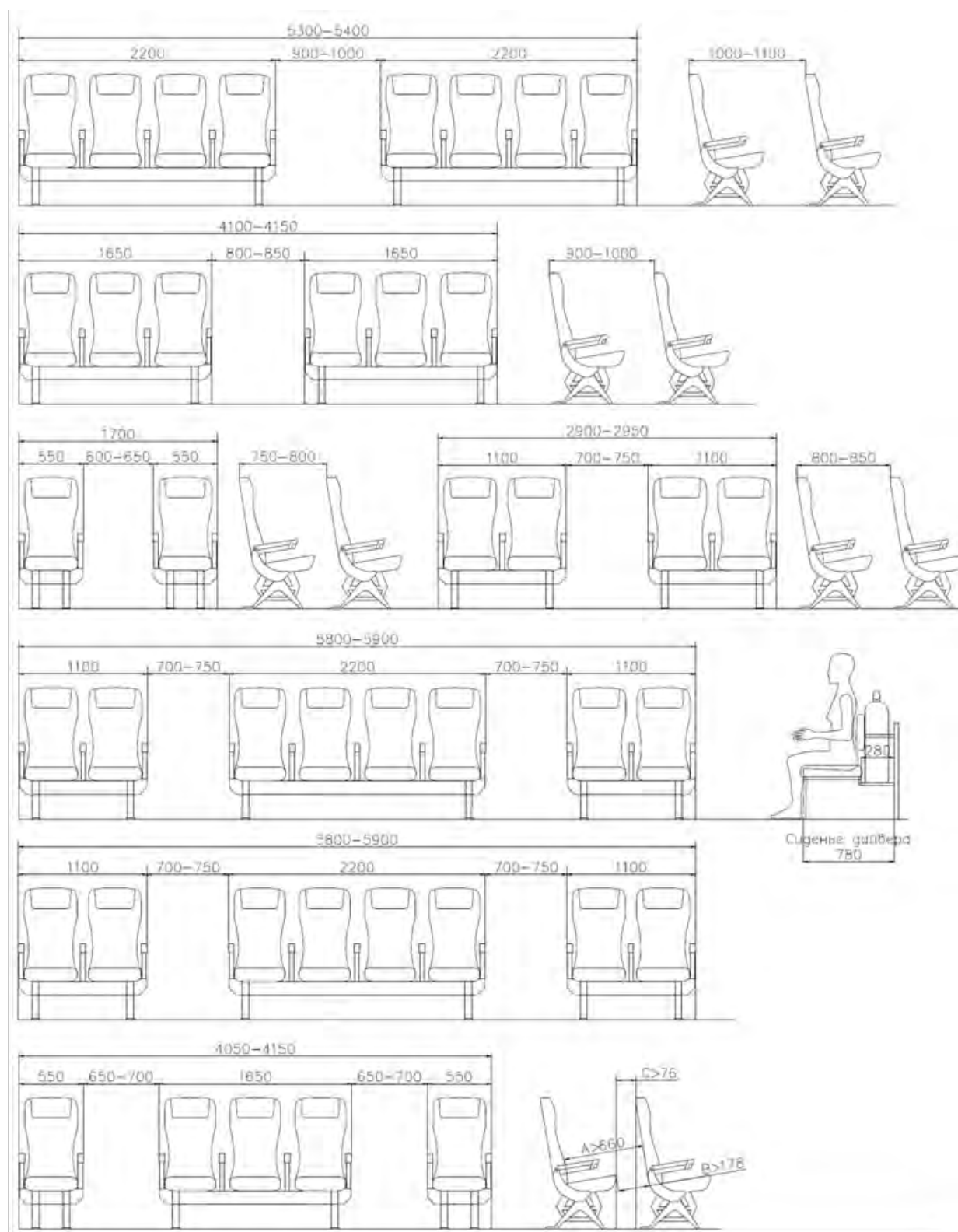


Рис. 10 – Предлагаемые автором компоновочные схемы салона на малых пассажирских судах (МПС). Показаны рекомендуемые размеры проходов при различном числе обслуживаемых сидений; шаг сидений, размеры сидений для дайверов.

Очевидно, что размещения пассажирских сидений в носовой части скоростных МПС следует избегать (хотя на малых скоростях доступ в носовой кокпит может быть привлекателен для пассажиров и

безопасен), равно как и ориентации пассажирских сидений лицом к борту судна [10]. В данном случае, компоновка судна позволяет минимизировать вероятность травм при столкновениях и маневрах.

Экономика эксплуатации МПС

Суда коммерческого назначения, и МПС не исключение, имеют целью извлечение прибыли их оператором. В подобных случаях экономическую модель принято описывать через коэффициент возврата инвестиций. Целевые функции проектирования F_{ROI} , основанные на подобных моделях, отдают предпочтение тихходным судам с большой пассажироместимостью:

$$F_{ROI} = \frac{\sum_i G - \sum_i E - C_0}{\sum_i E - C_0} \times 100\% \rightarrow \max$$

где C_0 - себестоимость судна, E и G - суммы доходов и эксплуатационных расходов, по годам эксплуатации i . На практике, на подобную целевую функцию серьезно влияет ряд факторов, например вопросы субсидирования маршрутов перевозок, наличия пассажиропотока, привлекательности судна и маршрута и приемлемости рейса по времени, стоимости вхождения в бизнес и т.д.

Психологическая реакция пассажира на продолжительность рейса T_r является одним из решающих факторов при обосновании скорости движения. Так, из опыта автора, время психологической усталости τ от «поездки» на судне типа «транспортёр» составляет:

- 40 минут при активном пребывании на судне – перемещение, фотосессии, бар и т.д.;
- 2 часа при пассивном пребывании, т.е. нахождения пассажира в кресле в салоне.

Превышения лимита усталости от рейса для МПС, т.е. $T_r > \tau$, особенно для судна типа «транспортёр» при наличии других видов транспорта, может приводить к отказу от поездки. На судах типа «тур-бот» оператор, как правило, предусматривает остановки, во избежание усталости пассажиров. С другой стороны, если продолжительность рейса находится вне «зоны усталости», то эксплуатационная скорость судна, иногда может быть снижена, для экономии топлива и возможности продажи сопутствующих услуг на борту.

Кроме того, для многих операторов МПС следует учесть стоимость вхождения в бизнес; в этом случае себестоимость (главным образом строительная стоимость) C_0 не должна превышать некую максимальную величину, что заставляет делать выбор в сторону судов меньших размеров:

$$C_0 \leq C_{0 \max}$$

При обосновании пассажироместимости МПС следует учитывать дискретность пассажиропотока. Замечено, что туператоры МПС работают с пассажиропотоком, измеряемым «в автобусах», т.е. кратным примерно 50 пассажирам. В противоположность этому, подходы IMO и ряда нормативных документов [4] имеют нишу «до 36 пассажиров», что не полностью соответствует потребностям рынка.

При анализе экономической эффективности нельзя обрывать со счетов и выполнение социальной функции. Например, одно место для пассажира МГН может «стоять» до 8 мест обычных пассажиров.

Таким образом, задача экономического обоснования проекта МПС превращается в задачу со множеством ограничений и не может быть сведена к простому анализу стоимости пассажиро-километра. В практике проектирования, подобные задачи решаются проектировщиком в тесном сотрудничестве с оператором судна (рис.11).

ПРОЕКТ СУДНА НА 50 ПАССАЖИРОВ

Модель: совершается рейс между пунктами А-Е-А три раза в день

Наименование	35 узлов	27 узлов	Примечание
Наибольшее количество пассажиров за рейс	50	50	
Коэф. загрузочности (% от наибольшего)	80%	80%	по данным заказчика
Тариф перевозки	4417	4417	70% - 6000, 20% - 4000, 10% - 3000, БЕЗ НДС
Количество планируемых рейсов в год	540	540	навигация май-октябрь три рейса в день
Коэффициент использования	0,81	0,81	уменьшает количество рейсов
Обслуживание коэф.	0,90	0,90	простой на обслуживание и ремонт
Погодный коэф.	0,90	0,90	простой из-за погоды
Итого годовой доход	77 274 000	77 274 000	БЕЗ НДС

Наименование	35 узлов	27 узлов	Примечание
Расстояние рейса (морские мили)	97	97	туда и обратно
Круизная скорость (узлов)	35	27	
Продолжительность рейса (часы)	2,71	3,59	туда и обратно
Расход топлива в час (литры)	120	200	
Стоимость топлива за литр	45,83	45,83	БЕЗ НДС
Пассажироплата за рейс	3880	3880	
Топливо на пассажиромилу (грамм)	192	156	
Топливо на пассажиромилу (литр)	0,23	0,19	
Расходы в навигационный период в месяц	915000	915000	данные заказчика
Расходы в межнавигационный период в месяц	250000	250000	данные заказчика
Количество членов экипажа	4	4	плюс самовый экипаж
Количество членов персонала	1	1	
Зарплата одного члена персонала в месяц	75000	75000	
Зарплата одного члена экипажа в месяц	105000	105000	средняя экипажа

Сводные данные по расходам	35 узлов	27 узлов	Примечание
Топливо	17 779 269	14 004 501	БЕЗ НДС
Экипаж + персонал	5 184 000	5 184 000	с учетом налога на ФЭП
Прочие расходы	7 655 000	7 655 000	НДС не вклетен
Итого годовые расходы	30 618 269	27 243 500	

Стоимость пассажиромилы	18,04	16,05	
Прибыль на пассажиромилу	27,45	29,48	
Годовая операционная прибыль	46 655 731	50 030 500	
Инвестиции			
Общие инвестиции	180 000 000	160 000 000	

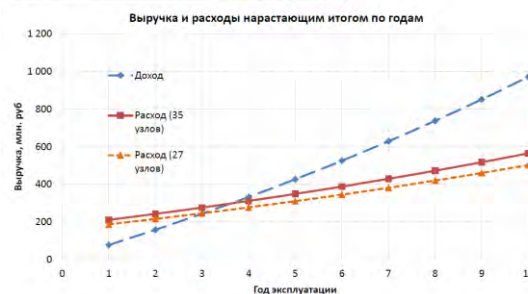


Рис. 11 – Пример экономического анализа эксплуатации вариантов судна на маршруте с различной скоростью.

Дизайн и перспективные проекты

Используемые в городах МПС являются частью городской среды, имеющей историческую и культурную составляющие [7] и поэтому их внешний облик и дизайн имеет важнейшее имиджевое значение. В [14] рассмотрены вопросы дизайна экстерьера и интерьера МПС применительно к судам разного назначения.

Коллективом АНМК по заказу российского производителя разработан проект катамарана длиной 14м (рис.12). Проект имеет черты экскурсионного судна: салон с панорамным обзором, носовая аппарель для высадки на необорудованный берег, носовой кокпит для фотосессий и т.д. Материал корпуса – алюминиевый сплав. Прототипом проекта послужил SG14 (рис.13), эксплуатируемый как МПС на 36 пассажиров в Австралии, имеющий категорию 1D как судно на 36 пассажиров.

Одним из вызовов рассматриваемого проекта является попытка адаптации компоновки судна, типичной для Австралии и полностью соответствующей NSCV [4], в рамках взаимодействия с РС. Объективно нет ни одной причины, по которой подобное судно не может

безопасно эксплуатироваться в РФ, включая комингсы нулевой высоты, сдвижные двери, расположение поста управления в салоне, а также «яхтенная» номенклатура оборудования... Все эти решения уже десятилетия используются для МПС за рубежом, но до сих пор не всегда встречают понимание в РФ.

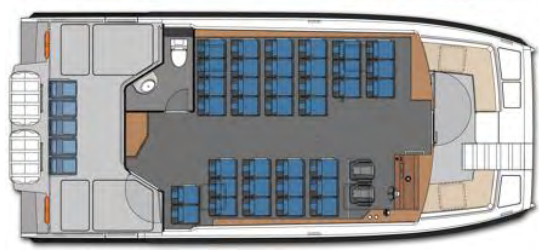


Рис. 12 – Перспективный проект МПС для российского рынка SG14P

Заключение

Развитие индустрии внутреннего туризма в РФ подразумевает освоение маршрутов в Европейской части России, Кавказа, Дальнего востока,

Калининградской области и т.д. - все эти регионы обладают морским побережьем или развитой сетью больших и малых рек. Отечественные туроператоры должны иметь возможность предложить виды отдыха на воде аналогичные тем, что уже десятилетиями предлагают операторы Турции, Египта, Таиланда и т.д. Это требует изменения подходов и к проектированию МПС, и к нормированию их характеристик, для открытия соответствующих «нормативных ниш».

К сожалению, сложившаяся практика разработки нормативных документов силами НИИ, далеких от практических проблем проектирования, постройки и эксплуатации МПС не приносит необходимого результата; к таким попыткам следует отнести разработку совместных правил РС и РКО в 2014 году.

В [14] автором предложена основанная на практике матрица безопасности, которая с теми или иными дополнениями может стать основой разработки отечественных правил. Нормативные документы должны предусматривать различные типы и архитектуру МПС, с учетом вида активности на борту и кратности пассажиропотока. Опыт зарубежных стран, в которых сегмент МПС получил значительное развитие.

Несмотря на появление в последние годы ряда интересных проектов, отечественная школа проектирования МПС по-прежнему рассматривает создание пассажирского судна не вокруг нужд пассажира и оператора, а вокруг требований регистров... Очевидно, ради создания эффективных и привлекательных судов этот рудиментарный подход должен быть преодолен в ближайшем будущем.



Рис. 13 – Алюминиевый катамаран пр. SG14 в Австралии

Литература

1. Назаров А.Г. Особенности нормативных подходов к малым судам//Морские интеллектуальные технологии, №1 Часть 1, 2023, с.29-37. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.002>
2. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства, 2022.
3. The Small Seagoing Passenger Ship Code. The Maritime & Coastguard Agency, 2015.
4. National Standard for Commercial Vessels (NSCV). Part B, General Requirements. Australian Transport Council, 2008.
5. Назаров А.Г. Проблемы совершенствования подходов к конструктивной противопожарной защите судов из композиционных материалов. Научные проблемы водного транспорта, №71(2),2022, с.74-84. DOI: 10.37890/jwt.vi71.252
6. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2. VTT Expert Services Ltd., Finland, 2016.
7. Nazarov A., Jabtanom A., Charatsidis N. Small Passenger Boats and Water Taxis: Aesthetic and Functional Aspects of Design //Marine Design Conference, RINA, 2014 - Coventry, UK. p.83-94.
8. Правила классификации и постройки судов. Российский Речной Регистр, 2019.
9. Latorre R.G., Nazarov A. Functionality and Safety of Small Passenger Craft: Some Lessons// 5th Chesapeake Power Boat Symposium - Annapolis, USA, 2016.

10. Назаров, А.Г. Особенности оценки ускорений при проектировании и эксплуатации малых высокоскоростных судов //Морской вестник - 2012. - №4 (44). - С.59-63.
11. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) – IMO, 2008 Edition
12. Saenbunwang S., Sawatpanich S., Potgieter W., Nazarov A. Small Passenger Craft for South East Asia: Design Specifics and Case Studies// China International Boat Show & High Performance Marine Vessels Conference (HPMV 2015).
13. Назаров А.Г. Параметрическое проектирование малых судов: программная реализация, Морские интеллектуальные технологии. 2023. Т.60. N2 Часть 1. С. 14—23.
14. Nazarov A. Designing Water Taxis// Marine Design 2020, 15th – 16th January 2020, Cádiz, Spain.

References

1. Nazarov A.G. Osobennosti normativnih podhodov k malim sudam [Specifics of normative approaches to small ships]//Morskie intellektualnie tehnologii, №1 Chast 1, 2023, s.29-37. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.002>
2. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. [Rules for the classification and construction of ships]. Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2022.
3. The Small Seagoing Passenger Ship Code. The Maritime & Coastguard Agency, 2015.
4. National Standard for Commercial Vessels (NSCV). Part B, General Requirements. Australian Transport Council, 2008.
5. Nazarov A.G. Problemi sovershenstvovaniya podhodov k konstruktivnoi protivopojarnoi zaschite sudov iz kompozicionnih materialov. [Problems of improvement of approaches to structural fire protection of ships in composite materials]. Nauchnie problemi vodnogo transporta, №71(2), 2022, s.74-84. DOI: 10.37890/jwt.vi71.252
6. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2. VTT Expert Services Ltd., Finland, 2016.
7. Nazarov A., Jabtanom A., Charatsidis N. Small Passenger Boats and Water Taxis: Aesthetic and Functional Aspects of Design//Marine Design Conference, RINA, 2014 - Coventry, UK. p.83-94.
8. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov. [Rules for the classification and construction of ships]. Rossiiskii Rechnoi Registr, 2019.
9. Latorre R.G., Nazarov A. Functionality and Safety of Small Passenger Craft: Some Lessons// 5th Chesapeake Power Boat Symposium - Annapolis, USA, 2016.
10. Nazarov, A.G. Osobennosti ocenki uskorenij pri proektirovanii i ekspluatatsii malyh vysokoskorostnyh sudov [Specifics of acceleration estimation in the design and operation of small high-speed vessels]//Morskoy vestnik - 2012. - №4 (44). - С.59-63.
11. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) – IMO, 2008 Edition
12. Saenbunwang S., Sawatpanich S., Potgieter W., Nazarov A. Small Passenger Craft for South East Asia: Design Specifics and Case Studies// China International Boat Show & High Performance Marine Vessels Conference (HPMV 2015).
13. Nazarov A.G. Parametricheskoe proektirovanie malyh sudov: programnaya realizaciya, [Parametric design of small vessels: software implementation]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. T.60. N2 CHast' 1. S. 14—23.
14. Nazarov A. Designing Water Taxis// Marine Design 2020, 15th – 16th January 2020, Cádiz, Spain.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Назаров Альберт Георгиевич, кандидат технических наук, FRINA, CEng, MSNAME, директор конструкторского бюро «АН Марин Консалтинг», 107113, Москва, ул. Шумкина, д.20, с.1, офис 501/502, e-mail: anmarineconsulting@ya.ru

Albert G. Nazarov, Ph.D. (Eng.), FRINA, CEng, MSNAME, Director of the design bureau "AN Marine Consulting", Shumkina str., 20, p.1, office 501/502, Moscow, 107113, Russian Federation, e-mail: anmarineconsulting@ya.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 12.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 02.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 07.11.2023.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.5.015.144:001.891.57

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.003>

К вопросу об оценке остойчивости судов на разрушающемся волнении

Бураковский Е.П.¹ e_burakovsky@mail.ru, Бураковский П.Е.² paul_b@mail.ru,

Веревошкин А.В.¹ aaa-andrey@mail.ru, Юсуп В.М.¹ v-y48@yandex.ru

¹ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» (филиал в г. Калининграде)

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»

Аннотация. При эксплуатации морских судов возникают различные аварийные ситуации, при этом наиболее опасные связаны с потерей остойчивости. Одной из причин опрокидывания судов является воздействие на них разрушающегося волнения. В настоящей работе показано, что традиционные подходы к оценке остойчивости судов на разрушающемся волнении не учитывают некоторые существенные особенности взаимодействия корпуса судна с волной, что ведёт к ошибке в опасную сторону. Проведенный анализ показал, что при ударе разрушающейся волны в борт судна необходимо учитывать смещение центра величины судна в сторону борта, к которому подходит разрушающаяся волна. Это обстоятельство приводит к исчезновению восстанавливающего момента и создает дополнительный кренящий момент на начальном этапе взаимодействия корпуса с разрушающейся волной. Для анализа динамики судна в статье использована модифицированная система уравнений крена и дрейфа, учитывающая указанные особенности взаимодействия судна с волной за счёт корректировки диаграммы статической остойчивости. Показано, что анализ динамики судна под воздействием разрушающейся волны с учётом трансформации диаграммы статической остойчивости и без него приводит к прямо противоположным выводам, а игнорирование указанного обстоятельства сопровождается ошибкой в опасную сторону при оценке остойчивости судна. Применение предложенных подходов к оценке остойчивости судов на разрушающемся волнении позволяет более объективно выполнять оценку безопасности их эксплуатации и может быть использовано в рамках концепции формализованной оценки безопасности. Разработанный математический аппарат может быть применен, в частности, при реализации блока контроля остойчивости судов в бортовых интеллектуальных системах.

Ключевые слова: разрушающееся волнение, удар волны, потеря остойчивости, трансформация диаграммы статической остойчивости, крен, дрейф, моделирование динамики судна.

Для цитирования: Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Веревошкин А.В., Юсуп В.М. К вопросу об оценке остойчивости судов на разрушающемся волнении. 2023. № 4 часть 1, С. 32—38. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.003

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.003>

On the issue of assessing the stability of ships on collapsing waves

Evgeny P. Burakovskiy¹ e_burakovsky@mail.ru, Pavel E. Burakovskiy² paul_b@mail.ru,

Andrey V. Verevochkin¹ aaa-andrey@mail.ru, Vyacheslav M. Yusyp¹ v-y48@yandex.ru

¹Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Kaliningrad, Russian Federation

²Baltic Fishing Fleet State Academy, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. During the operation of sea vessels, various emergency situations arise, the most dangerous ones being associated with loss of stability. One of the reasons for ships capsizing is the impact on them of collapsing waves. This paper shows that traditional approaches to assessing the stability of ships in breaking waves do not take into account some essential features of the interaction of the ship's hull with the wave, which leads to a dangerous error. The analysis showed that when a breaking wave hits the side of a ship, it is necessary to take into account the displacement of the center of the vessel's size towards the side to which the breaking wave approaches. This circumstance leads to the disappearance of the righting moment and creates an additional heeling moment at the initial stage of interaction of the hull with the breaking wave. To analyze the dynamics of the vessel, the article uses a modified system of roll and drift equations, which takes into account the indicated features of the interaction of the vessel with the wave by adjusting the static stability diagram. It is shown that analysis of the dynamics of a vessel under the influence of a breaking wave, taking into account the transformation of the static stability diagram and without it, leads to directly opposite conclusions, and ignoring this circumstance is accompanied by an error in a dangerous direction when assessing the stability of the vessel. The application of the proposed approaches to assessing the stability of ships in breaking waves allows for a more objective assessment of the safety of their operation and can be used within the framework of the concept of a formalized safety assessment. The developed mathematical apparatus can be used, in particular, when implementing a vessel stability control unit in on-board intelligent systems.

Key words: breaking waves, wave impact, loss of stability, transformation of static stability diagram, roll, drift, modeling of vessel dynamics.

For citation: Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Andrey V. Verevchkin, Vyacheslav M. Yusyp On the issue of assessing the stability of ships on collapsing waves. 2023. № 4 part 1, P. 32—38. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.003

Введение

При эксплуатации морских судов возникают различные аварийные ситуации, при этом наиболее опасные связаны с потерей остойчивости, т.к. они, как правило, развиваются стремительно и сопровождаются гибелью значительной части или всего экипажа. Анализ аварийных ситуаций свидетельствует о том, что суда могут опрокидываться по ряду причин: вследствие захвата судна попутной волной [1, 2], при зарывании носовой оконечности во встречную волну [3, 4, 5], под воздействием ударов разрушающегося волнения [1, 6, 7] и т.д. По результатам исследования последней ситуации, проведенных рядом специалистов, были предложены два подхода к моделированию остойчивости судна на разрушающемся волнении. Первый, предложенный А.Н. Холодилиным и С.Н. Благовещенским, связан с оценкой кинетической энергии, сообщаемой судну при ударе в борт разрушающейся волны, и сопоставлении её с запасом потенциальной энергии с использованием диаграммы статической или динамической остойчивости.

В рамках второго подхода, предложенного Н.Б. Севастьяновым [1, 6, 8], помимо крена одновременно рассматривается динамика судна в условиях стремительно развивающегося дрейфа от удара волны. При этом поведение судна описывается системой двух дифференциальных уравнений: бортовой качки и дрейфа.

В рассматриваемой задаче особый интерес представляет моделирование ситуации, связанной с поведением малого судна под воздействием крупного разрушающегося волнения, что сопряжено с рядом затруднений. Как отмечено в [9], использование для оценки остойчивости такого судна уравнения баланса энергии удара волны в борт и работы восстанавливающего момента, определенной по общепринятой диаграмме остойчивости, не дало удовлетворительного результата. Также на основании анализа аварий ряда малых судов в условиях разрушающегося волнения показано, что динамика судна в такой ситуации не может быть описана одним лишь дифференциальным уравнением крена, а остойчивость судна не характеризуется диаграммой, полученной для судна на тихой воде [9].

1. Особенности динамики взаимодействия судна с разрушающейся волной

Наглядное представление об ограниченности возможности применения диаграммы статической остойчивости для оценки риска опрокидывания судна под ударом одиночной волны в борт даёт рис. 1, заимствованный из работы [10]. Видно, что на начальном этапе воздействия волны на борт судна уровень воды существенно повышается со стороны подверженного удару борта, что приводит к смещению центра величины в этом направлении.

При этом в тот промежуток времени, когда судно находится под воздействием одиночной волны, т.е.

подверженный воздействию волны борт погружен глубже, чем противоположный, восстанавливающий момент становится отрицательным, т.е. стремится наклонить судно в том же направлении, что и удар волны. Это обусловлено тем обстоятельством, что при подходе к борту судна крупной одиночной волны и повышении уровня воды со стороны этого борта центр величины будет смещаться в ту же сторону и возникающий момент будет стремиться наклонить судно на тот борт, где уровень воды ниже. При этом создаётся ситуация, когда все моменты, включая момент от сил дрейфа и от удара волны в борт, стремятся опрокинуть судно. Хотя этот период достаточно непродолжителен, его игнорирование может привести к серьёзным ошибкам в оценке остойчивости судна. Подобная картина была получена при испытании модели малого судна на разрушающемся волнении, что представлено в [6, 11].

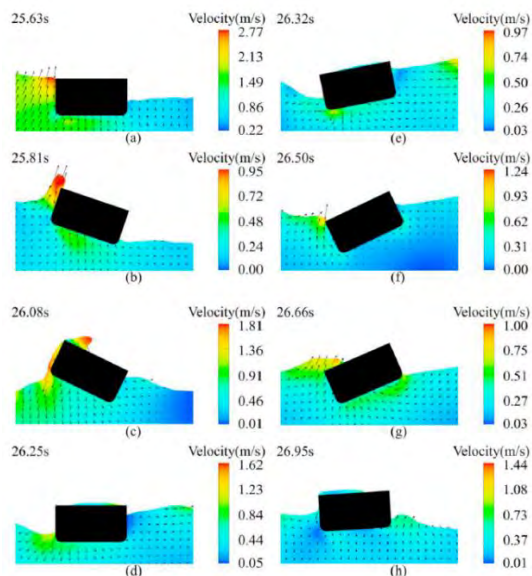


Рис. 1. Динамика судна под воздействием удара одиночной волны в борт [10]

Таким образом, на протяжении времени воздействия разрушающейся волны на борт судна восстанавливающий момент вообще отсутствует, а традиционный восстанавливающий момент, определяемый по диаграмме статической остойчивости, также становится кренящим. С учётом этого можно сделать вывод, что использование диаграммы статической остойчивости для оценки опасности опрокидывания судна под действием разрушающегося волнения приводит к ошибке в опасную сторону.

2. Моделирование поведения судна при ударе в борт разрушающейся волны

Для оценки остойчивости судна воспользуемся подходом, предложенным Н.Б. Севастьяновым [1, 6, 8], при этом система уравнений, описывающая

динамику судна под воздействием удара разрушающейся волны, будет иметь вид

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{D}{g} + \lambda_{22} \right) \eta'' + \lambda_{24} \cdot \theta'' + Q(\eta') = P(t); \\ & (J_x + \lambda_{44}) \theta'' + M_R(\theta') + M_\theta = M(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где η – поперечное смещение судна (боковой дрейф);

D – весовое водоизмещение судна;

g – ускорение свободного падения;

λ_{22} – присоединенная масса в направлении дрейфа;

λ_{24} – присоединенный статический момент относительно продольной центральной оси;

$Q(\eta')$ – сила сопротивления дрейфу судна;

J_x – момент инерции судна относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести судна;

λ_{44} – присоединенный момент инерции относительно той же оси;

$M_R(\theta')$ – демпфирующий момент при бортовой качке;

$M(t)$ – кренящий момент, действующий на судно в условиях удара разрушающейся волны и возникающего при этом дрейфа;

M_θ – восстанавливающий момент, определяемый с учётом трансформации ватерлинии вследствие повышения уровня воды с одного борта при подходе и ударе разрушающейся волны;

$P(t)$ – сила удара разрушающейся волны.

Кренящий момент $M(t)$, действующий на судно в условиях дрейфа после удара разрушающейся волны, можно определить согласно [1, 8]:

$$M(t) = P(t) \cdot (z_p - z_g) \cdot \cos(\theta) + Q_\eta \cdot (z_g - z_q) \cdot \cos(\theta) - \lambda_{24} \cdot \eta'', \quad (2)$$

где z_p, z_q – аппликаты точек пересечения линии действия силы удара волны и силы сопротивления дрейфу с диаметральной плоскостью судна;

z_g – аппликата центра тяжести судна.

Силу сопротивления дрейфу можно определить согласно рекомендациям, изложенным в [6]:

$$Q_\eta = 0,5 \cdot C_q \cdot \rho \cdot (\eta')^2 \cdot L \cdot T, \quad (3)$$

где L – длина судна;

T – осадка судна;

ρ – плотность воды;

C_q – гидродинамический коэффициент, зависящий от соотношения главных размеров судна, коэффициента общей полноты и угла крена, определяемый по регрессионным моделям, представленным в [6].

При этом согласно [6]

$$C_q = 1,10 + 0,04 \cdot X_1 - 0,21 \cdot X_2 - 0,68 \cdot X_3 - 0,62 \cdot X_4 + 0,03 \cdot X_2^2 + 0,59 \cdot X_3^2, \quad (4)$$

где $X_1 = L/B - 5,5$; $X_2 = B/T - 2,0$; $X_3 = 0,85 - \delta$;

$X_4 = \theta$ – факторы, использованные при построении регрессионной модели;

δ – коэффициент общей полноты.

Для вычисления аппликаты z_q также можно воспользоваться регрессионными моделями [6]:

$$z_q = T \left(1 - \frac{\bar{I}_q}{\cos \theta} \right); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_q &= 0,19 + 0,05 \cdot X_1 + 0,28 \cdot X_2 - 0,45 \cdot X_3 + \\ &+ 1,01 \cdot X_4 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,212 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\ &+ 0,07 \cdot X_2^2 - 1,90 \cdot X_3^2 + 4,03 \cdot X_4^2 - 4,50 \cdot X_4^3, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{I}_q = I_q / T$ – величина условного плеча кренящего момента, отнесённая к осадке судна.

Максимальная сила P_η и время удара t_y разрушающейся волны могут быть определены с использованием зависимостей, полученных в рамках теории одиночной волны [7]

$$P_\eta = 1,2 \cdot \lambda_{22} \cdot F_{1max}; \quad (7)$$

$$t_y = \psi_1 \sqrt{H_p}, \quad (8)$$

где F_{1max} – максимальное значение ускорения в одиночной волне, определяемое в зависимости от относительной высоты волны γ согласно [7];

$$\psi_1 = \frac{\pi}{\sqrt{g(1+\gamma)}} - \text{коэффициент, зависящий от}$$

относительной высоты волны γ , представленный в [7];

$$\gamma = \frac{h_e}{H_p} - \text{относительная высота одиночной}$$

волны;

h_e – высота одиночной волны;

H_p – расчётная глубина водоёма, принимаемая равной глубине акватории под подошвой периодических волн.

Принимая, что сила удара возрастает по закону, близкому к треугольному, и считая, что время начала удара совпадает с началом отсчёта, можно записать следующее выражение для $P(t)$

$$P(t) = \begin{cases} 2 \cdot P_\eta \cdot \frac{t}{t_y} & \text{при } t \leq 0,5 \cdot t_y, \\ 2 \cdot P_\eta \cdot \left(1 - \frac{t}{t_y} \right) & \text{при } 0,5 \cdot t_y < t \leq t_y, \\ 0 & \text{при } t > t_y. \end{cases} \quad (9)$$

Аппликата точки приложения силы удара волны z_p определяется согласно [7]

$$z_p = \frac{1}{2} \cdot \psi_2 \cdot (T + h_e), \quad (10)$$

где $\psi_2 = f\left(\frac{T}{H_p}, \gamma\right)$ – коэффициент, зависящий от

относительной высоты волны γ и отношения осадки к расчётной глубине акватории, представленный в [7].

Для определения величины демпфирующего момента и присоединённого момента инерции при бортовой качке можно воспользоваться зависимостями, представленными в [6], с учётом особенностей, возникающих при качке на мелководье.

Так, влияние мелководья на коэффициент демпфирования учитывается согласно [7] путём введения поправочного коэффициента K_1

$$K_1 = 1 + \left(\frac{T}{H} \right)^2 - 0,4 \cdot \left(\frac{T}{H} \right)^3, \quad (11)$$

где H – глубина акватории.

Аналогично вводится поправочный коэффициент для момента инерции присоединённых масс воды на мелководье

$$K_2 = 1 + \left(\frac{T}{H}\right)^2 + 0,1 \cdot \left(\frac{T}{H}\right)^3. \quad (12)$$

Таким образом, момент инерции присоединённых масс при бортовой качке в условиях мелководья можно определить из выражений

$$\lambda_{44} = \bar{\mu}_{\theta\theta} \cdot I_{V_3} \cdot K_2; \quad (13)$$

$$I_{V_3} = \frac{D \cdot (B^2 + 2T^2)}{12g} \cdot \frac{\pi}{10\delta}, \quad (14)$$

где $\bar{\mu}_{\theta\theta}$ – относительное значение присоединённого момента инерции, определяемое по регрессионным моделям [6], и зависящее от соотношений главных размерений судна, коэффициента общей полноты δ и полноты ватерлинии α , а также от периода бортовой качки.

Входящий в систему уравнений (1) демпфирующий момент можно определить из условия

$$M_R(\theta') = 2 \cdot (J_x + \lambda_{44}) \cdot \bar{\lambda}_{\theta\theta} \cdot n_\theta \cdot K_1 \cdot \theta', \quad (15)$$

где $\bar{\lambda}_{\theta\theta}$ – относительное значение коэффициента демпфирования, определяемое по регрессионным моделям [6], и зависящее от соотношений главных размерений судна, коэффициента общей полноты δ , коэффициента полноты ватерлинии α и мидель-шпангоута β , отношения площади скуловых килей к площади ватерлинии, периода бортовой качки, а также от угла крена;

$$n_\theta = \sqrt{\frac{D \cdot h_0}{J_x + \lambda_{44}}} - \text{частота бортовой качки судна;}$$

h_0 – начальная поперечная метacentрическая высота.

Присоединенная масса λ_{22} и присоединенный статический момент λ_{24} определялись в соответствии с [12] с использованием графиков А.3. Салькаева.

3. Результаты и их обсуждение

Разработанная в настоящей статье методика была применена для оценки остойчивости судов на разрушающемся волнении. В частности, были рассмотрены дрейфер водоизмещением 45,8 т и танкер, имеющий водоизмещение порожнем 16300 т. Результаты расчёта для первого судна представлены на рис. 2.

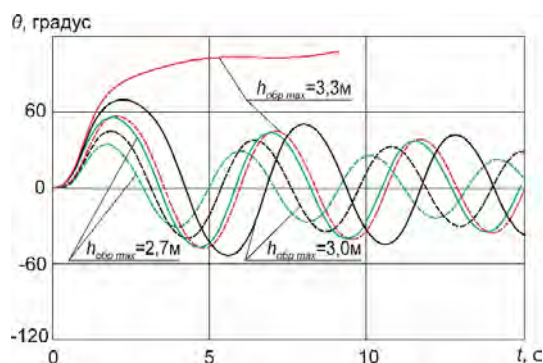


Рис. 2. Моделирование динамики дрейфера в условиях воздействия разрушающейся волны

Расчёт выполнялся для трёх значений максимальных высот разрушающихся волн при отношении высоты волны к глубине акватории $\gamma=0,8$.

Сплошные линии соответствуют расчёту по предложенной методике, учитывающей трансформацию диаграммы статической остойчивости, пунктирные линии – традиционно применяемой процедуре оценки остойчивости, не учитывающей этого фактора. Видно, что при всех рассмотренных высотах волн расчёт по предложенной схеме дает большие углы крена, а при максимальной высоте разрушающихся волн $h_{обр\ max}=3,3$ м наблюдается опрокидывание судна. При этом использование традиционной схемы оценки остойчивости приводит к выводу, что судно выдерживает удар и такой волны.

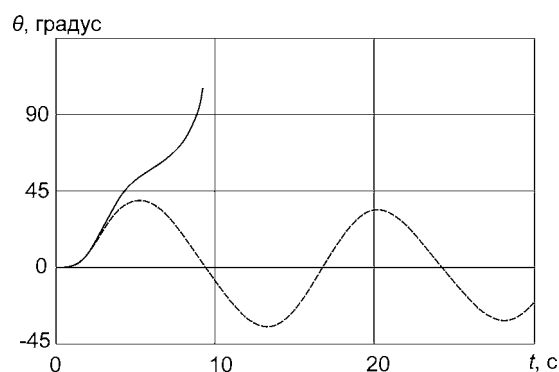


Рис. 3. Зависимости крена судна от времени с учетом (сплошная линия) и без учёта (пунктирная линия) трансформации диаграммы статической остойчивости

Результаты моделирования динамики танкера водоизмещением 16300 т представлены на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3 представлены зависимости крена судна от времени, пунктирная линия соответствует исходной модели, предложенной Н.Б. Севастьяновым, и не учитывает трансформации диаграммы статической остойчивости при подходе одиночной волны к борту судна, сплошная линия построена с использованием предложенных в настоящей статье подходов. На рис. 4 приведены зависимости дрейфа от времени.

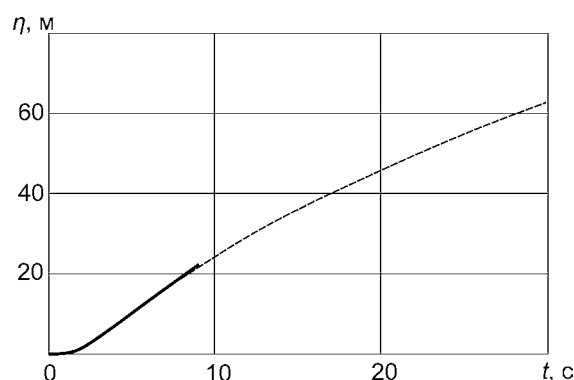


Рис. 4. Зависимости дрейфа судна от времени с учетом (сплошная линия) и без учёта (пунктирная линия) трансформации диаграммы статической остойчивости

Видно, что трансформация диаграммы статической остойчивости оказывает существенное влияние на крен судна, при этом величина дрейфа в обоих моделях практически совпадает. Зависимость,

представленная на рис. 3 пунктиром (традиционная модель), показывает, что судно выдерживает удар разрушающейся волны, а максимальный угол крена не превышает 40° .

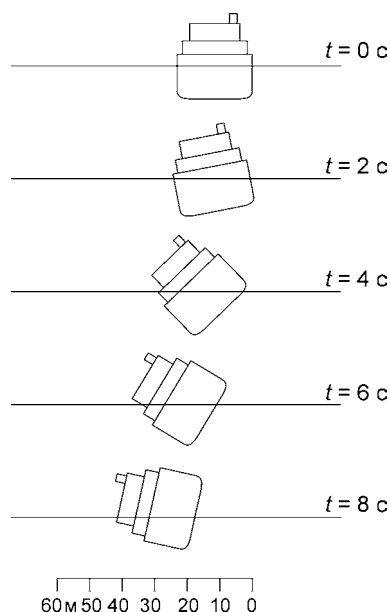


Рис. 5. Последовательные положения судна при ударе в борт разрушающейся волны

При этом динамика судна характеризуется возникновением затухающих колебаний относительно положения равновесия.

Ситуация, показанная на рис. 3 сплошной линией (предложенная в настоящей статье модель), соответствует резкому нарастанию угла крена и опрокидыванию судна в результате воздействия разрушающейся волны.

На рис. 5 представлены положения судна в процессе развития аварийной ситуации, связанной с его опрокидыванием.

Заключение

Таким образом, анализ динамики судна под воздействием разрушающейся волны с учётом трансформации диаграммы статической остойчивости и без него приводит к прямо противоположным выводам, а игнорирование указанного обстоятельства сопровождается ошибкой в опасную сторону при оценке остойчивости судна.

Применение предложенных подходов к оценке остойчивости судов на разрушающемся волнении позволяет более объективно выполнять оценку безопасности их эксплуатации и может быть использовано в рамках концепции формализованной оценки безопасности [13].

Разработанный математический аппарат может быть применён, в частности, при реализации блока контроля остойчивости судов в бортовых интеллектуальных системах [14].

Литература

1. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. СПб.: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
2. Нечаев Ю.И. Остойчивость судов на попутном волнении. Л.: Судостроение, 1978. 272 с.
3. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу об определении нагрузки, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее залипании на встречном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4(42), т. 3. С. 19-25.
4. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитриевский В.А. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография. СПб.: Лань, 2020. 300 с.
5. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. To the question of vessels safety ensuring in the emergency situations // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: Activities in navigation. UK, Croydon: CRC Press/Balkema, 2015. P. 19–24.
6. Нечаев Ю.И. Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Л.: Судостроение, 1989. 240 с.
7. Холодильн А.Н., Шмырев А.Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении. Л.: Судостроение, 1976. 328 с.
8. Севастьянов Н.Б. Остойчивость промысловых судов. Л.: Судостроение, 1970. 200 с.
9. Севастьянов Н.Б. Расчётные ситуации для оценки остойчивости и физические картины опрокидывания судов // Труды КТИРПИХ. Калининград, 1982. Вып. 99. С. 110–122.
10. Wang J., Qin H., Hu Z., Mu L. Three-dimensional study on the interaction between a container ship and freak waves in beam sea // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2023. Vol. 15. P. 100509.
11. Dahle E., Kjarland O. The Capsizing of M/S Helland-Hansen. The investigation and recommendations for preventing similar accidents // Norwegian Maritime Research. 1980. Vol 8, № 3. P. 2–13.
12. Благовещенский С.Н., Холодильн А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В 2 т. Т. 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение, 1976. 176 с.
13. Решетов Н.А., Захаров А.А. Формализованная оценка безопасности и ее влияние на судоходную индустрию // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2004. Вып. 27. С. 7–13.
14. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Нечаев Ю.И., Прохнич В.П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф // Морской вестник. 2013. №1(45). С.89–95.

References

1. Nechaev Yu.I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy [Catastrophe theory: a modern approach to decision making]. Saint-Petersburg, Art-Ekspress, 2011, 392 p.
2. Nechaev Yu.I. Ostoychivost' sudov na poputnom volnenii [Stability of vessels in passing waves]. Leningrad, Sudostroenie, 1978, 272 p.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2018) K voprosu ob opredelenii nagruzki, deystvuyushchey na palubu sudna v nosovoy okonechnosti pri ee zalivani na vstrechnom volnenii [On the issue of determining the load acting on the deck of the vessel in the bow tip when it is flooded on a counter wave]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(42), Vol. 3, pp. 19–25.
4. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Konstruktivnoe obespechenie bezopasnosti moreplavaniya: monografiya [Constructive provision of navigation safety: monograph]. Saint Petersburg, Lan', 2020. 300 p.
5. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. To the question of vessels safety ensuring in the emergency situations. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: Activities in navigation. UK, Croydon, CRC Press/Balkema, 2015, pp. 19–24.
6. Nechaev Yu.I. Modelirovanie ostoychivosti na volnenii. Sovremennye tendentsii [Simulation of stability on a waves. Current trends]. Leningrad, Sudostroenie, 1989, 240 p.
7. Kholodilin A.N., Shmyrev A.N. Morekhodnost' i stabilizatsiya sudov na volnenii [Seaworthiness and stabilization of ships on the waves]. Leningrad, Sudostroenie, 1976, 328 p.
8. Sevast'yanov N.B. Ostoychivost' promyslovyykh sudov [Stability of fishing vessels]. Leningrad, Sudostroenie, 1970, 200 p.
9. Sevast'yanov N.B. (1982) Raschetnye situatsii dlya otsenki ostoychivosti i fizicheskie kartiny oprokidyvaniya sudov [Design situations for stability assessment and physical patterns of ship capsizing]. Trudy KTIRPiKh, Issue 99, pp. 110–122.
10. Wang J., Qin H., Hu Z., Mu L. (2023) Three-dimensional study on the interaction between a container ship and freak waves in beam sea. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 15, p. 100509.
11. Dahle E., Kjarland O. (1980) The Capsizing of M/S Helland-Hansen. The investigation and recommendations for preventing similar accidents. Norwegian Maritime Research, vol. 8, № 3, pp. 2–13.
12. Blagoveshchenskiy S.N., Kholodilin A.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya [Handbook of Ship Statics and Dynamics]. In 2 volumes. Vol. 2. Dinamika (kachka) korablya [Dynamics (pitching) of the ship]. Leningrad, Sudostroenie, 1976, 176 p.
13. Reshetov N.A., Zakharov A.A. (2004) Formalizovannaya otsenka bezopasnosti i ee vliyanie na sudokhodnyuyu industriyu [Formalized safety assessment and its impact on the shipping industry]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva, issue 27, pp. 7–13.
14. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnich V.P. (2013) Problemy kontrolya dinamiki sudna v ekstremal'nykh situatsiyakh na osnove metodov sovremennoy teorii katastrof [Problems of controlling the dynamics of a ship in extreme situations based on the methods of modern disaster theory]. Morskoy vestnik, №1(45), pp. 89–95.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бураковский Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры устройства и живучести корабля, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде, 236036, г. Калининград, Советский проспект, 82, e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Бураковский Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Калининградский государственный морской технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: paul_b@mail.ru

Evgeny P. Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng), professor of the Department of Theory and Survivability of the Ship, Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Sovetskiy ave, 82, Kaliningrad, 236036, Russian Federation, e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Baltic Fishing Fleet State Academy, Kaliningrad state marine technical University, Sovetskiy ave, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: paul_b@mail.ru

Веревочкин Андрей Владимирович, кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры устройства и живучести корабля, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде, 236036, г. Калининград, Советский проспект, 82, e-mail: aaa-andrey@mail.ru

Юсып Вячеслав Михайлович, начальник кафедры устройства и живучести корабля, филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова» в г. Калининграде, 236036, г. Калининград, Советский проспект, 82, e-mail: v-y48@yandex.ru

Andrey V. Verevochkin, Ph.D. (Eng), Deputy Head of Department of Theory and Survivability of the Ship, Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Sovetskiy ave, 82, Kaliningrad, 236036, Russian Federation, e-mail: aaa-andrey@mail.ru

Vyacheslav M. Yusyp, head of the Department of Theory and Survivability of the Ship, Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Sovetskiy ave, 82, Kaliningrad, 236036, Russian Federation, e-mail: v-y48@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 05.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.10.2023.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.004>**Имитационное моделирование процесса образования ледовой наделки при движении судна в слое тёртого льда**Ионов Б.П.² ionoff.8@yandex.ru, Погодин Е.В.¹ evpolitehnik@yandex.ru, Сандаков М.Ю.¹ m_sandakov@mail.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В исследовании ледовой ходкости транспортных судов важной задачей является изучение движения судна в слое тёртого льда. Данная задача является не в полной мере решенной в предыдущих работах по ледотехнике. Натурные и модельные исследования позволили создать физическую картину взаимодействия слоя тёртого льда с корпусом судна с формированием ледовой наделки впереди носовой оконечности корабля. Имитационное моделирование процесса образования ледовой наделки при движении судна в слое тёртого льда позволило уточнить результаты прежних исследований по данной тематике. Геометрическое моделирование создания ледовой наделки велось с учётом граничных условий, обусловленных физическим процессом взаимодействия корпуса судна с тёртым льдом. В результате компьютерного моделирования ледовая наделка была представлена из трех частей различных поверхностей с графически описанными свойствами и размерами. Уточнение геометрии формы ледовой наделки позволяет в дальнейшем перейти к расчётам ледовой ходкости, используя известные методики. Что является необходимым при проектировании транспортных судов, способных уверенно эксплуатироваться в районах плавания с ледовой обстановкой.

Ключевые слова: Ледовая наделка, ледовая ходкость, слой тёртого льда, транспортное судно, геометрическое моделирование, четверть эллипсоида, часть цилиндриоида, каркасная модель.

Благодарности: авторы выражают благодарность Евгению Михайловичу Грамузову за консультации в работе над статьёй.

Для цитирования: Ионов Б.П., Погодин Е.В., Сандаков М.Ю. Имитационное моделирование процесса образования ледовой наделки при движении судна в слое тёртого льда, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 39—44. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.004

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.004>**Simulation modeling of the process of ice formation during the movement of a vessel in a layer of grated ice**Boris P. Ionov² ionoff.8@yandex.ru, Evgeniy V. Pogodin¹ evpolitehnik@yandex.ru,Mihail Y. Sandakov¹ m_sandakov@mail.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Russian Federation, ²St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. An important task in the study of ice navigation of transport vessels is to study the movement of the vessel in the layer of grated ice. This task is not fully solved in previous work on glacial engineering. Field and model studies made it possible to create a physical picture of the interaction of the layer of grated ice with the hull of the ship with the formation of an ice pad in front of the bow of the ship's tip. Simulated modeling of the process of ice plating formation during the movement of the vessel in the layer of grated ice made it possible to clarify the results of previous studies on this topic. Geometric simulations of the creation of an ice plating were carried out taking into account the boundary conditions caused by the physical process of interaction of the hull with rubbed ice. As a result of computer modeling, the ice pad was presented in three parts of different surfaces with graphically described properties and dimensions. The clarification of the geometry of the shape of the ice pad allows us to move on to the calculations of the ice stroke using well-known methods. This is necessary in the design of transport vessels capable of confidently operating in areas of navigation with an ice situation.

Keywords: Ice pad, ice stroke, layer of grated ice, transport vessel, geometric modeling, quarter ellipsoid, part of cylinder, frame model.

Appreciation: The authors express gratitude to Evgeny M. Gramuzov for consulting in the work on the article.

For citation: Boris P. Ionov, Evgeniy V. Pogodin, Mihail Yu. Sandakov. Imitation modeling of the process of formation of an ice plating during the movement of a vessel in a layer of grated ice, Marine intelligent technologies. 2023. № 4 part 1, P. 39—44. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.004

Введение

Одной из актуальных задач ледовой ходкости транспортных судов является изучение особенностей движения в слое тёртого льда с

размером льдин в плане менее 1,5 метра. Данные ледовые явления образуются в районах с интенсивным движением с водного транспорта в период зимних навигаций, что характерно для российских устьевых портов. В значительной мере

движение транспортов в слое тёртого льда происходит при ледокольных проводках каравана судов (см. рис 1). В ранних работах по ледовой ходкости судов в тёртых льдах не были решены задачи по определению сил ледового сопротивления для транспортных судов с большим коэффициентом общей полноты корпуса [3].

Моделирование процесса образования ледовой наделки при движении судна в слое тёртого льда

Анализ результатов натурных наблюдений за работой транспортного судна в слое тёртого льда позволил создать физическую картину взаимодействия судна при данной ледовой обстановке [7, 11].



Рис. 1. Движение транспортного судна в слое тёртого льда

К корпусу транспортного судна прикладывается сила от упора винтов, и наблюдаемый объект начинает прямолинейное движение с минимальной скоростью. С увеличением скорости движения под носовой оконечностью корабля уплотняется слой битого льда, образуя вал из обломков, который толкается корпусом по направлению движения судна. Следует отметить, что подводная часть ледяного вала намного больше его надводной части. Это следует из разности плотностей льда и воды, составляющей 10 %.

По мере продвижения судна в тёртом слоистом льду происходит увеличение уплотнённой массы обломков льда, которая продолжает двигаться впереди носовой оконечности. Результаты натурных наблюдений, проводимые авторами показывают, что геометрические размеры этой массы льда в длину составляют от 0,3В до 3В (ширина судна), а в ширину не превышают В (ширина судна). В ходе натурных исследований было зафиксировано, что масса уплотнённого слоя льда «достраивает» носовую оконечность исследуемого транспортного судна, придавая ей (носовой оконечности) более удобные формы для продвижения в поле тёртого льда. Данное формообразование становится очень похоже на корпус судна с более эффективными геометрическими обводами носовой оконечности, но большей длины (см. рис.2). Подобному образованию было дано название «ледяная наделка» [6,7].

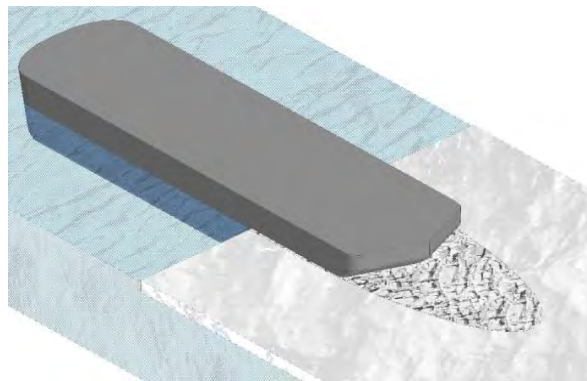


Рис. 2. Ледовая наделка

При небольшой скорости относительного движения судна ($F_r = 0.08-0.1$) обтекание корпуса обломками льда происходит по действующей ватерлинии. В этих условиях ледяная наделка работает, как ледяной клин, раздвигая обломки льда по нормали по отношению к действующей ватерлинии. При движении массива уплотнённого льда перед носовой оконечностью наблюдается отрыв крайних льдин и замещение их другими льдинами в целом с сохранением формы ледяной наделки. Льдины, находящиеся на границе ледовой наделки носовой оконечности, корпуса обтекают образованные льдом судовые обводы. Если прикладываемой мощности силовой энергетической установки достаточно для движения судна с толкаемой перед корпусом массы уплотнённого льда, то наблюдается устойчивая фаза движения непрерывным ходом. Можно уверенно сказать, что процесс движения судна в слое тёртого льда стационарен.

На основании проведённых исследований имеется возможность высказать гипотезу о геометрической форме поверхности ледовой наделки. В плане ледовая наделка расположена симметрично относительно продольной оси (диаметральной плоскости судна), с шириной ледового образования близкой к ширине судна. На виде с боку, форма наделки ограничена плавной кривой линией, величина которой по вертикали плавно изменяется от нуля до размера осадки судна.

Создания ледовой наделки процесс динамический, а значит, судно должно обладать скоростью. Вектор скорости движения направлен параллельно диаметральной плоскости судна, и очевидно, что продольный размер ледовой наделки связан со скоростью движения судна в слое тёртых льдов. Траектория движения тока обломков льда представляет собой линии положительной кривизны относительно диаметральной плоскости корпуса судна и его основной линии. С достаточной уверенностью можно сказать, что геометрия поверхности ледовой наделки, впереди форштевня корпуса, представляет собой четверть поверхности эллипсоида (см. рис.3). Большая ось эллипсоида расположена в диаметральной плоскости судна (ДП), параллельно действующей ватерлинии, две другие расположены в плоскости перпендикулярной ДП. Данный поверхность имеет три главные оси различной величины и поэтому является трехосным эллипсоидом [9,10].

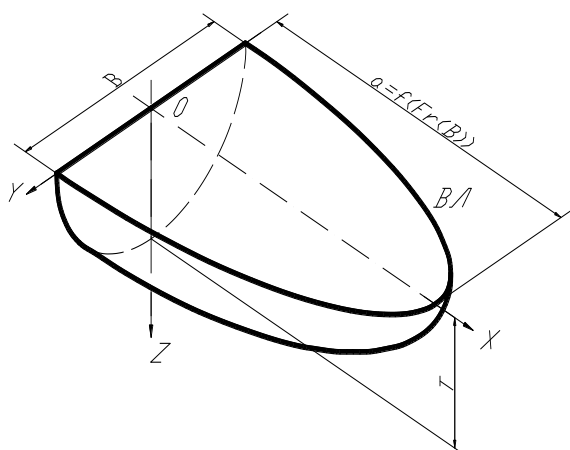


Рис. 3. Геометрия ледовой наделки из мелкобитого льда в виде четверти эллипсоида

В аналитической форме поверхность ледовой наделки можно представить каноническим уравнением эллипсоида:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

где: $a \neq b \neq c$ - полуоси эллипсоида.

Так как, для описания ледовой наделки необходима лишь часть эллипсоида, а именно его четверть с граничными условиями:

$$0 \leq x \leq a; -B/2 \leq y \leq B/2; 0 \leq z \leq T \quad (2)$$

В ранее представленных работах по этой тематике [6,9,10], были сделаны некоторые допущения, упрощающие и ограничивающие реальный физический объект и процессы, связанные с изучаемым объектом. В представлении геометрии формы ледовой наделки, как четверти поверхности эллипсоида, также принимается некоторое допущение. На плоскости проекции с осями Z и Y (проекция корпуса) площадь четверти эллипса не в полной мере перекрывает проекцию подводной части корпуса судна (см. рис.4). Тем самым, наблюдается нарушение гладкости поверхности взаимодействия корпуса судна и ледовой наделки, так как цилиндрическая вставка корпуса судна с большой достоверностью является призматической поверхностью.

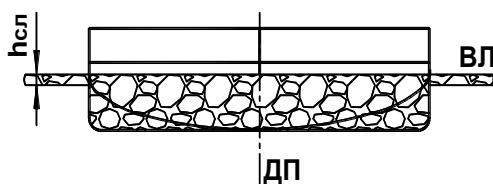


Рис. 4. Допущения в описании формы ледовой наделки

При анализе результатов модельных испытаний [8] было сделано уточнение о форме поверхности

ледовой наделки. Было отмечено, что всю поверхность ледовой наделки можно разделить на три части;

- поверхность четверти эллипсоида, впереди форштевня корпуса судна;
- каркасная поверхность перехода;
- поверхность части цилиндрида, в носовой части цилиндрической вставки корпуса.

Поверхность цилиндрида, линейчатая поверхность третьего порядка может быть представлена аналитически в декартовых координатах каноническим уравнением

$$(x^2 + y^2)z = kxy \quad (3)$$

где: k — коэффициент, определяющий количество «складок» поверхности.

Методика виртуального моделирования процесса образования ледовой наделки при движении судна в слое тёртого льда позволяет более корректно описать форму ледовой наделки. Для решения выше поставленной задачи был применен метод геометрического моделирования с использованием отечественного графического пакета КОМПАС-3D. В процессе моделирования был выполнен переход из формы поверхности четверти поверхности эллипсоида в форму призматической поверхности части цилиндрида, соблюдая условия гладкости и неразрывности исследуемого объекта. Геометрическое моделирование проводилось по трем участкам исследуемой поверхности.

Моделирование первого (носового) участка поверхности наделки проводилось через построение каркаса 3-хосного эллипсоида с помощью изолиний, принадлежащих трем основным проекциям. Эллипсоид представлен в системе координат, связанной с теоретическим корпусом судна. Решение велось с помощью построения изолиний поверхности наделки в трех плоскостях проекции: X, Y; Z, Y; X, Z. На проекции, имеющей оси X и Y, представлена линия пересечения поверхности ледовой наделки с плоскостью поля слоя тёртого льда. Форма линии эллипса на плоскости проекции с осями Z и Y представляет собой линию пересечения судовой поверхности также с плоскостью ледяного покрова, проведённой через опорные точки с применением решения о взаимном положении двух эллипсов, имеющих одну точку касания. Геометрия линии эллипса, лежащего в плоскости с осями X и Z (диаметральная плоскость теоретического корпуса судна), строится через две крайние точки. Данные крайние точки принадлежат главным осям эллипса, определяемые по результатам модельных исследований [4]. Имея три каркасные линии, мы можем построить (натянуть) поверхность трехосного эллипсоида, определив граничные условия. В результате построений была получена каркасная модель четверти поверхности эллипсоида. Используя каркасную модель, мы получили возможность сформировать твердотельную модель четверти эллипсоида. Для уточнения эллиптической формы ледовой наделки при помощи булевых операций вычитаем из твердотельной модели эллипсоида часть носовой оконечности теоретического корпуса судна. Данный приём позволил создать геометрическую модель приближенную к

идеальному представлению о взаимодействии носовой оконечности судна со слоем тёртого льда (см. рис.5)

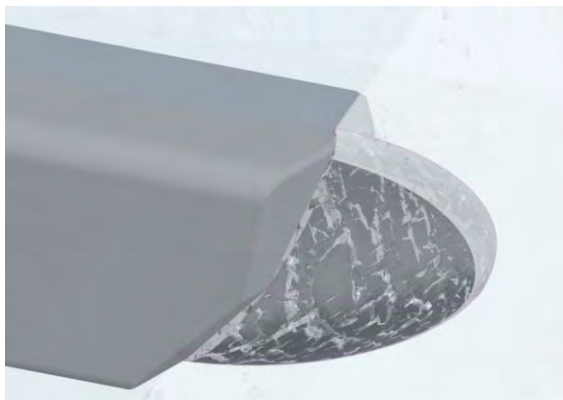


Рис.5. Ледовая наделка в форме четверти эллипсоида в районе носовой оконечности

При моделировании линий перехода было принято решение о построении опорных линий перехода в трех плоскостях проекций. Для нахождения линий был использован приём наложения геометрических зависимостей, реализованный в командах Касания и Эквидистанта использованной графической программой КОМПАС-3D. При построении учитывались граничные условия изменения форм линий, а также особенности взаимодействия корпуса судна со слоем тёртого льда при заходе части битого льда под днище судна. Основным из граничных условий принималось авторами, что форма ледовой наделки является гладкой и только положительной кривизны. Из данного заявления следует, что к любой точке поверхности ледовой наделки можно провести только одну касательную плоскость и одну нормаль. После создания каркаса по опорным линиям была сформирована поверхность перехода и преобразована в твердотельную модель (см.рис. 6).

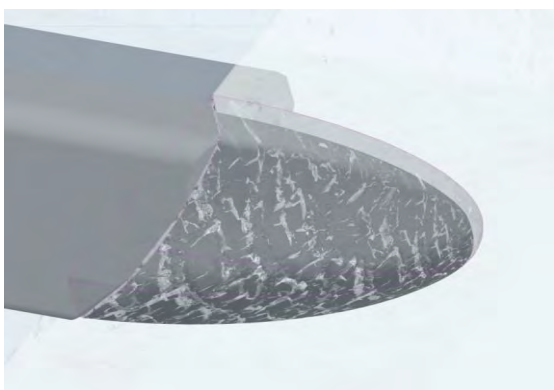


Рис.6. Ледовая наделка с поверхностью перехода и частью эллипсоида

Моделирование части ледовой наделки, которая взаимодействует с передней частью цилиндрической вставки корпуса судна, проводилось по ранее изложенной схеме. Были построены опорные линии, создан каркас, построена каркасная модель части цилиндриоида и преобразована в твердотельную геометрическую модель. Построение модели велось с учётом физической картины взаимодействия ледовой наделки с корпусом судна и окружающей средой. Ширина этой части ледовой наделки была добавлена на величину толщины льда. Моделирование части цилиндриоида велось на расстояние от начала цилиндрической вставки корпуса судна до границы физического распада ледовой наделки на отдельные льдины (см. рис.7).

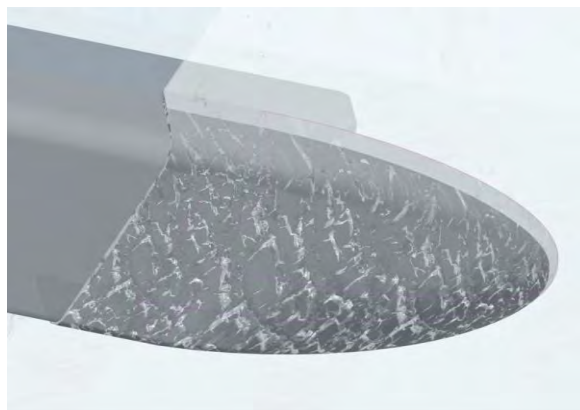


Рис.7. Ледовая наделка частью цилиндриоида, поверхностью перехода и четвертью эллипсоида

Заключение

В результате имитационного моделирования процесса образования ледовой наделки при движении судна в слое тёртого льда была создана геометрическая картина взаимодействия части корпуса со слоем льда, которая представляет собой комбинацию из трёх поверхностей: четверти эллипсоида, каркасной поверхности перехода и части цилиндриоида. Проведённое исследование позволяет в дальнейшем перейти к расчётам ледовой ходкости, используя известные методики [1,2]. Что является необходимым при проектировании транспортных судов, способных уверенно эксплуатироваться в районах плавания с ледовыми явлениями.

Литература

1. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов: Монография.– СПб.: Судостроение, 2001.– 512 с.
2. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов: Монография.–СПб.: Судостроение, 2013.– 512 с.
3. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. - Л.: Судостроение, 1968. - 238с

4. Сазонов К.Е. Морская ледотехника: Учебное пособие (СПбГМТУ).- СПб.- 2019.-311с.
5. Сазонов К.Е. Оценка вклада вертикальных бортов цилиндрической вставки в ледовое сопротивление судна. СПб: Морской вестник №4(28).-2008-С.110-111
6. Сандаков М.Ю. Ходкость транспортных судов в сплошных льдах. Мат. конф.Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве. НГТУ.- Н.Новгород. – 2002. – С.269-275
7. Сандаков М.Ю. Проведение натурных испытаний нефтеналивной баржи пр. 167 в ледовых условиях совместно с разными толкачами и ледоколами. Мат. Конф. Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве. Н.Новгород.2006.с.151-152
8. Сандаков М.Ю. Гушин Е.А. Модельные исследования ледовой ходкости судов с большим коэффициентом полноты в битом льду. Мат.Конф. Будущее тех. науки. НГТУ 2010.с.237-238.
9. Ионов Б.П. , Сандаков М.Ю. Исследование взаимодействия судов с большим коэффициентом общей полноты и битого льда. «Морской Вестник» №3(51) -2014 - С. 102-104
10. Сандаков М.Ю., Козловцев П.Г. Математическое описание формы и определение параметров ледовой наделки Мат. конф. Будущее технической науки. НГТУ – Н.Новгород.-2012- С.102-105
11. Ионов Б.П., Кузьмин Н.А., Сандаков М.Ю., Тихонова Н.Е. Оценка ледовых условий при создании геометрии корпуса судна ледового плавания. СПб. «Морской Вестник» №1(65).-2018.-С.74-76

References

1. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaja hodkost' sudov [Ice seaworthiness of vessels]: Monografija.– SPb.: Sudostroenie, 2001.– 512 s.
2. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Proetirovanie ledokolov [Icebreakers design]: Monografija.-SPb.: Sudostroenie, 2013.-512 s.
3. Kashteljan V.I., Poznjak I.I., Ryvlin A.Ja. Soprotivlenie l'da dvizheniju sudna [Ice resistance to vessel movement]. - L.: Sudostroenie, 1968. - 238s
4. Sazonov K.E. Morskaja ledotehnika [Marine ice engineering]: Uchebnoe posobie (SPbGMTU).- SPb.- 2019.-311s.
5. Sazonov K.E. Ocenka vklada vertikal'nyh bortov cilindricheskoj vstavki v ledovoe soprotivlenie sudna [Assessment of the contribution of the vertical sides of the cylindrical insert to the ice resistance of the vessel]. SPb: Morskoj vestnik №4(28).-2008-S.110-111
6. Sandakov M.Ju. Hodkost' transportnyh sudov v sploshnyh l'dah [Seaworthiness of transport vessels in solid ice]. Mat. konf.Sovremennye tehnologii v korablestroitel'nom obrazovanii, nauke i proizvodstve. NGTU.- N.Novgorod. – 2002. – S.269-275
7. Sandakov M.Ju. Provedenie naturnyh ispytaniy nefenalivnoj barzhi pr. 167 v ledovyh uslovijah sovместno s raznymi tolkachami i ledokolami [Conducting full-scale tests of the oil barge pr. 167 in ice conditions together with various pushers and icebreakers]. Mat. Konf. Sovremennye tehnologii v korablestroitel'nom obrazovanii, nauke i proizvodstve. N.Novgorod.2006.s.151-152
8. Sandakov M.Ju. Gushhin E.A. Model'nye issledovaniya ledovoj hodkosti sudov s bol'shim koeficientom polnoty v bitom l'du [Model studies of ice seaworthiness of vessels with a large coefficient of completeness in broken ice]. Mat.Konf. Budushhee teh. nauki. NGTU 2010.s.237-238.
9. Ionov B.P. , Sandakov M.Ju. Issledovanie vzaimodejstviya sudov s bol'shim koeficientom obshhej polnoty i bitogo l'da [Investigation of the interaction of vessels with a large coefficient of total completeness and broken ice]. «Morskoj Vestnik» №3(51) -2014 - S. 102-104
10. Sandakov M.Ju., Kozlovcev P.G. Matematicheskoe opisanie formy i opredelenie parametrov ledovoj nadelki [Mathematical description of the shape and determination of the parameters of the ice pad] Mat. konf. Budushhee tehnicheskoy nauki. NGTU – N.Novgorod.-2012- S.102-105
11. Ionov B.P., Kuz'min N.A., Sandakov M.Ju., Tihonova N.E. Ocenka ledovyh uslovij pri sozdanii geometrii korpusa sudna ledovogo plavaniya [Assessment of ice conditions when creating the geometry of the hull of an ice navigation vessel]. SPb. «Morskoj Vestnik» №1(65).-2018.-S.74-76

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ионов Борис Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лопманская, 3, e-mail: ionof.8@yandex.ru

Boris P. Ionov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ionoff.8@yandex.ru

Погодин Евгений Владимирович, старший преподаватель кафедры инженерной графики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: evpolitehnik@yandex.ru

Evgeniy V. Pogodin, Assistant professor of the Department of engineering graphics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Minin, 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: evpolitehnik@yandex.ru

Сандаков Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной графики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: m_sandakov@mail.ru,

Mihail Yu. Sandakov, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of engineering graphics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Minin, 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: m_sandakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 30.08.2022.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.11.2022.

Принята к публикации/accepted for publication 07.11.2022.

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
**TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF
SHIPBUILDING PRODUCTION**

Научная статья
УДК 538.911 62-242

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.005>

**Моделирование нагрузок и особенности изменения структуры материала
стального поршня газового генератора**

Сюсюка Е.Н.¹ sollain66@rambler.ru, Клименко Е.С.¹ kati.klim@mail.ru,
Парфенов В.А.¹ vlad.parfenov.03@inbox.ru, Осипенко И.Р.¹ igorosipenko2004@gmail.com

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе приводится обоснование выбора материала поршня ДВС газового генератора с применением различных методов исследования. Объектом исследования выбран стальной поршень ДВС газового генератора марки JGC 624 GS-N.L производителя GE Jenbacher. Целью данной статьи является анализ изменения нагрузок в различных сечениях стального поршня и соответствующее изменение структуры материала, уточнение фазового состава материала поршня. Научная новизна исследования в статье состоит в том, что в нем были использованы различные методы, а именно металлографические исследования поршня и трехмерное твердотельное моделирование с помощью программы КОМПАС-3D с расчетом термоустойчивости. В результате исследования было проведено сравнение стальных и алюминиевых поршней, металлографические исследования образцов из разнонагруженных частей поршня (из шапки и юбки), создана трехмерная модель поршня ДВС газового генератора в программе Компас 3D, произведен расчет задачи термоупругости, которые показали, что наибольшие напряжения и деформации возникают в местах максимальных температурных нагрузок. Результаты и материалы работы могут использоваться для дальнейшего исследования и фазового анализа образцов поршня.

Ключевые слова: модель, компьютерное моделирование, стальной поршень, физическая структура, металлографические исследования, твердость образцов, сталь 45, сталь 35, конечно-элементная сетка, трехмерное моделирование.

Для цитирования: Сюсюка Е.Н., Клименко Е.С., Парфенов В.А., Осипенко И.Р. Моделирование нагрузок и особенности изменения структуры материала стального поршня газового генератора. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 45—52. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.005

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.005>

**Modeling of loads and features of changing the structure of the material of the
steel piston of a gas generator**

Elena N. Syusyuka¹ sollain66@rambler.ru, Ekaterina S. Klimenko¹ kati.klim@mail.ru,
Vladislav A. Parfenov¹ vlad.parfenov.03@inbox.ru, Igor R. Osipenko¹ igorosipenko2004@gmail.com

¹The Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The paper considers the differences in the physical working conditions of steel and aluminum pistons; substantiates the choice of the piston material of the internal combustion engine of a gas generator using various research methods. The object of the study was the steel piston of the internal combustion engine of the gas generator brand JGC 624 GS-N.L manufacturer GE Jenbacher. The purpose of this article is to analyze the changes in loads in various sections of the steel piston and the corresponding change in the structure of the material, clarifying the phase composition of the piston material. The scientific novelty of the research in the article is that various methods were used in it, namely metallographic studies of the piston and three-dimensional solid-state modeling using the COMPASS-3D program with the calculation of thermal stability. As a result of the study, a comparison of steel and aluminum pistons was carried out, metallographic studies of samples from differently loaded parts of the piston (from the cap and skirt), a three-dimensional model of a gas generator internal combustion engine piston was created.

Key words: model, computer modeling, steel piston, physical structure, metallographic studies, hardness of samples, steel 45, steel 35, finite element mesh, three-dimensional modeling.

For citation: Elena N. Syusyuka, Ekaterina S. Klimenko, Vladislav A. Parfenov, Igor R. Osipenko Modeling of loads and features of changing the structure of the material of the steel piston of a gas generator. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 45—52. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.005

Введение

В современных дизельных двигателях в настоящее время наряду с алюминиевыми применяются стальные поршни. Вопрос выбора материала поршня очень актуален [1], так как при обеспечении высоких мощностных показателей поршень должен иметь минимальную массу, малый удельный расход топлива, значительную прочность, износостойкость рабочих поверхностей, выдерживать тепловые нагрузки. Удельная мощность современных дизельных двигателей составляет 100 кВт/л. и будет продолжать возрастать, а значит, будет расти и максимальное давление в цилиндрах, что также увеличивает нагрузку на поршни. Обычно срок службы поршня дизеля определяется краем камеры сгорания, на который приходится особенно высокое пиковое давление и температура. В зависимости от материала эта область может разогреваться до температуры от 300 °С до 350 °С, а фактически до 400 °С.

Стальной поршень обладает достаточной прочностью и долговечностью, имеет более низкую стоимость; сборную конструкцию; расстояние между

кольцами и общая высота уплотняющей части меньше, чем у алюминиевых, соответственно уменьшается вес двигателя, а рабочее давление может быть повышено до 240 бар и более. При этом, уменьшается расход топлива и выбросы CO₂. Тепловое расширение стального поршня сравнимо с аналогичной характеристикой чугунного блока, поэтому достигается достаточно хорошее уплотнение.

Все эти преимущества приводят к возможности увеличения мощности двигателя до средних удельных значений. Для двигателей с большей удельной мощностью стальные поршни не являются идеальным решением, т.к. при температурах выше 550°С сталь образует слой окалины, в котором легко развиваются трещины, а трещины в приповерхностном слое могут привести к трещинам в основе и, соответственно, к разрушению материала (рис. 1 а, б). Более низкая теплопроводность стали замедляет теплоотвод от дна поршня, и при превышении температуры 350°С охлаждающее масло теряет свои свойства и образует масляный нагар.



Рис. 1,а. Алюминиевый поршень



Рис. 1,б. Стальной поршень

Материалы и методы

Объектом исследования является стальной поршень ДВС газового генератора марки JGC 624 GS-N.L производителя GE Jenbacher. Фазовый состав материала поршня точно неизвестен, задача

состояла в приближенном его определении методами физического анализа. На рис. 2 представлен вид газового генератора, его технические характеристики представлены в таблице 1 [2].



Рис. 2. Газовый генератор марки JGC 624 GS-N.L
(Jenbacher Gas Engine | Mechanical To Electrical Energy - YouTube)

Таблица 1

Технические характеристики газового генератора

Расход топлива (постоянная работа) (Нм³/ч)	996,0
Мощность электрическая (кВт)	4404,0
Мощность тепловая (кВт)	4050,0
Мощность постоянная (PRIME) (кВт)	4404,0
Двигатель	J 624 GS-H01
Обороты двигателя (об./мин.)	1 500,0
КПД электрический (%)	46,5
КПД тепловой (%)	42,9
КПД общий (%)	89,4
Количество цилиндров	24,0
Макс. температура окружающей среды (°C)	40,0
Момент инерции маховика (кг*м²)	211,00
Частота тока (Гц)	50,0
Напряжение (кВ)	10,5
Предельное значение скорости вращения (об./мин.)	2250,0

Методы исследования: трехмерное твердотельное моделирование.

С помощью графической программы КОМПАС-3D и системы APM FEM смоделированы нагрузки на поршень газового генератора. Инструменты APM FEM дают возможность определить недостатки конструкции на этапе проектирования и позволяют повысить эффективность и производительность анализа нагрузок [3-5].

Одной из целей данной научной работы было показать возможность практического решения задачи геометрического моделирования и

исследования поршня на базе универсальной САПР КОМПАС. Поэтому нас заинтересовал вопрос о применимости данной САПР в области моделирования и расчета на прочность с применением температурных нагрузок стального поршня ДВС газового генератора марки JGC 624 GS-N.L производителя GE Jenbacher. Нами было выполнено трехмерное твердотельное моделирование изделия (рис. 3), а также расчет задачи термоупругости (при совместном выполнении статического и теплового расчетов).

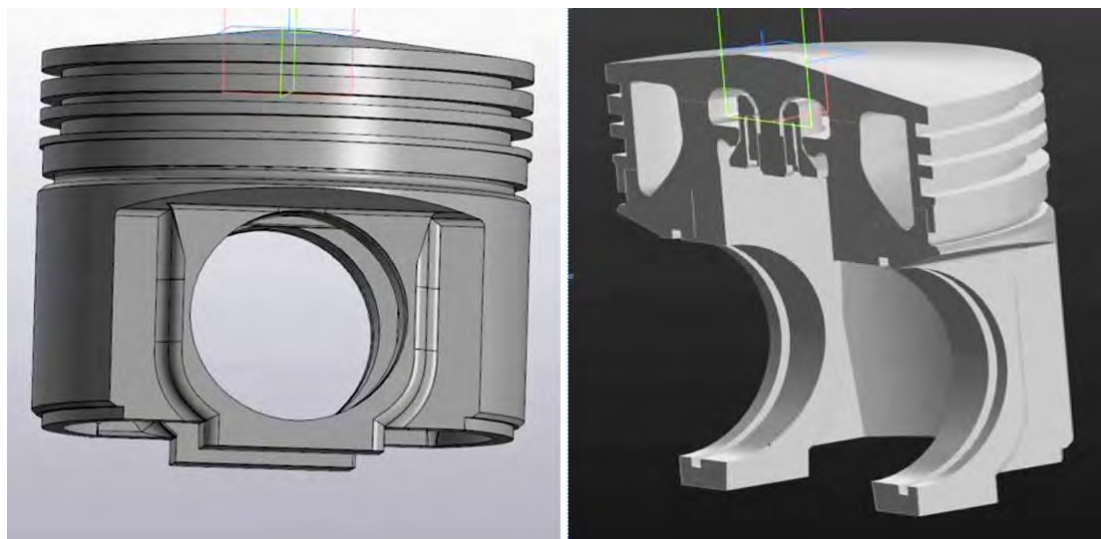


Рис 3. Трехмерное твердотельное моделирование поршня в программе КОМПАС-3D

Прочностной анализ содержит 5 групп объектов: нагрузки и закрепления, совпадающие поверхности, конечно-элементная (КЭ) сетка, слои и карты

результатов. Генерация КЭ сетки осуществляется с помощью операции, параметрами которой являются максимальная длина стороны элемента,

максимальный коэффициент сгущения на поверхности и коэффициент разрежения в объеме. Более расширенное задание параметров КЭ-сетки предусмотрено в модуле APM Studio, а именно: задание точек на ребрах, указание точек, вокруг которых следует выполнить дополнительное сгущение, задание различной сетки на гранях задания одной детали, задание различного шага для разных деталей. В построенной трехмерной модели компонента поршня сгенерирована конечно-элементная сетка с 4-х узловыми тетраэдрами (рис. 4).

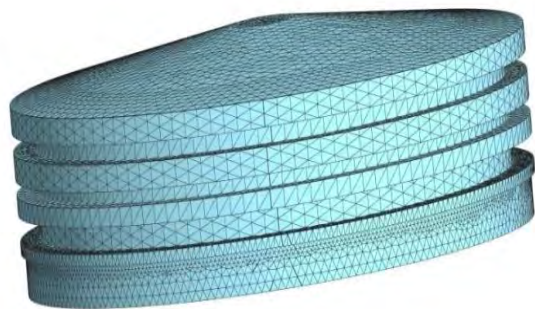


Рис. 4. Конечно-элементная сетка компонента поршня

На рис. 5 показано, что максимальные напряжения и деформация происходит в местах, отмеченных красным цветом, где действуют, в основном, температурные нагрузки: максимальная температура взята из экспериментальных данных на работающем генераторе по измерению температуры в области головки поршня – 400°C , минимальные температуры – 300°C в нижней части юбки поршня. Для моделирования напряженно-деформированного состояния материала головки была выбрана сталь 45 ГОСТ 1050-2013. Характеристики стали: Предел текучести 560 Н/мм^2 , модуль упругости нормальный 210000 Н/мм^2 , коэффициент Пуассона 0.3, Плотность 0.000008 кг/мм^3 , температурный коэффициент линейного расширения $0.000013 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, Теплопроводность $0.047 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{мм})$, предел прочности при сжатии 600 Н/мм^2 , Предел выносливости при растяжении 294 Н/мм^2 , Предел выносливости при кручении 150 Н/мм^2 . Информация о нагрузках: максимальная заданная температура 367°C .

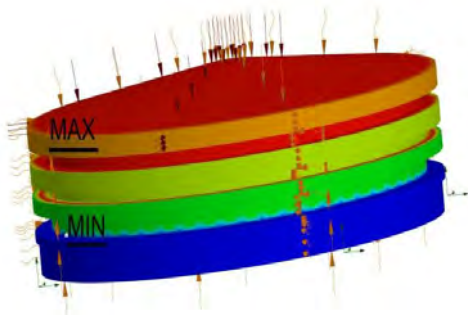


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние поршня с применением температурных нагрузок

Получены: коэффициент запаса по пределу текучести: минимальное значение $0,033175 \text{ Н/мм}^2$, максимальное – $8,114002 \text{ Н/мм}^2$; коэффициент запаса по пределу прочности минимальное значение $0,057879 \text{ Н/мм}^2$, максимальное – 10 Н/мм^2 .

Результаты данной работы показали, что система APM FEM при проведении прочностных расчетов обеспечивает значительную оперативность расчетов и достоверность результатов. Данные расчетов, полученные для решения некоторых известных задач с температурными напряжениями и данные литературных источников практически совпадают. Система позволяет производить прочностные расчеты с высокой достоверностью [5].

Методы исследования: металлографические

Из тела поршня, прошедшего полный цикл эксплуатации, с целью изучения микроструктуры были вырезаны образцы материала из головки и юбки поршня (рис. 6), так как физические условия эксплуатации верхней и нижней части различны. Марка стали изначально неизвестна, предполагается, что сталь отлична в разных частях поршня.

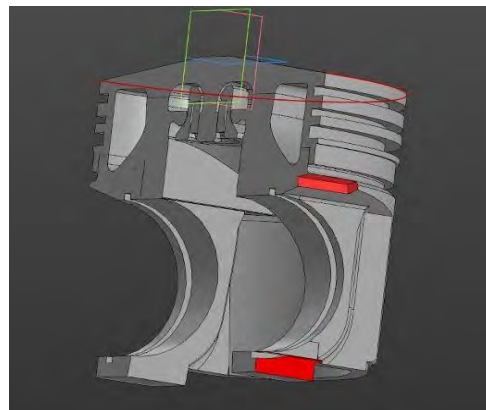


Рис. 6. Схема вырезки образцов из поршня

Как показано на рис. 7 и 8 сделаны фотографии металлографических образцов оптическим микроскопом с 40-кратным увеличением, вырезанных из головки и юбки поршня. Образцы подготовлены к исследованию в соответствии с ГОСТ 3443 -87.

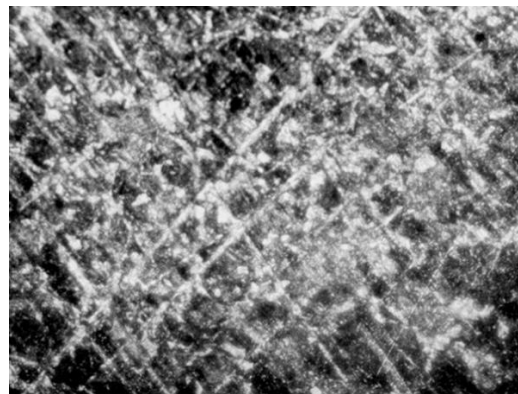


Рис. 7. Микроструктура поверхности образца из головки поршня.

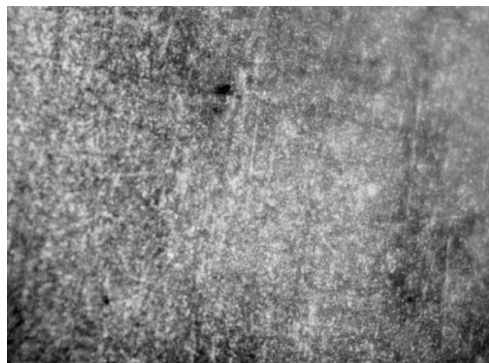


Рис. 8. Микроструктура поверхности образца из юбки поршня

Сравнение со схемами и фотографиями структуры стали из атласа [6] показывает наличие бейнита в образце, вырезанном из юбки поршня. Бейнит – микроструктура стали в виде феррито-цементитной смеси игольчатого типа, получаемая в результате промежуточного превращения при достаточно большой степени переохлаждения аустенита до 300-400°C. Такая структура обеспечивает получение хорошего сочетания механических свойств стали. Бейнит с тонкой неслоистой структурой обычно состоит из цементита и феррита, богатого дислокациями. Большая плотность дислокаций в феррите, присутствующем в бейните, и мелкие размеры пластинок бейнита делают этот феррит более твердым, чем обычно. Бейнитные стали, как правило, прочнее и тверже, чем перлитные стали, но при этом они демонстрируют желаемое сочетание прочности и пластичности. Твердость бейнита имеет промежуточное значение между твердостью перлита и нетемперированного мартенсита при одинаковой твердости стали.

Из сравнения со схемами атласа можно сделать вывод, что сталь в верхнем образце предположительно является сталью 45, а сталь в нижнем образце – сталью 35. Сталь 45 является углеродистой сталью с содержанием углерода около 0,45%. Эта сталь имеет хорошую обрабатываемость, а также достаточную прочность и твердость для использования в различных конструкциях [7].

Химический состав стали 45:

- Углерод (C): 0,42-0,50%
- Кремний (Si): 0,17-0,37%
- Марганец (Mn): 0,50-0,80%
- Фосфор (P): не более 0,035%
- Сера (S): не более 0,035%

Механические свойства стали 45:

- Предел текучести: 450 МПа
- Временное сопротивление: 700 МПа
- Относительное удлинение при разрыве: 14%

Сталь 45 широко применяется в машиностроительной и строительной промышленности, например, в производстве шестерен, валов, рессор, заготовок дляковки, а также различных крепежных элементов.

Сталь 35 относится к углеродистым конструкционным сталям и имеет следующие характеристики:

1. Содержание углерода: 0,32-0,39%.
2. Содержание марганца: 0,5-0,8%.
3. Содержание кремния: не более 0,35%.

4. Содержание серы: не более 0,05%.
5. Содержание фосфора: не более 0,045%.

Механические свойства стали 35 зависят от условий термической обработки, формы и размеров заготовок, а также от способа изготовления конечных изделий. В целом, сталь 35 характеризуется следующими механическими свойствами:

1. Предел прочности при растяжении: 590-780 МПа.
2. Временное сопротивление при растяжении: 390-540 МПа.
3. Относительное удлинение при разрыве: 14-22%.
4. Относительное сужение при разрыве: 50-60%.
5. Твердость по Бринеллю: 111-167 НВ.
6. Ударная вязкость: 55-70 Дж/см².

Эти свойства обеспечивают стали 35 высокую прочность, устойчивость к износу и возможность обработки различными способами. Однако, следует отметить, что точные механические свойства могут отличаться в зависимости от способа производства конкретной заготовки и ее размеров. Поэтому, перед использованием стали 35 в конкретном проекте, рекомендуется провести испытания на механические свойства конкретных образцов этой стали. Эти характеристики обеспечивают стали 35 высокую прочность и твердость, а также достаточную пластичность и свариваемость. Она широко используется в машиностроении, приборостроении, в производстве деталей и конструкций, которые требуют высокой прочности и устойчивости к износу.

При помощи электронного твердомера «Технотест ТЭМП-3» была определена твердость каждого образца (рис. 9, 10), с использованием переводной таблицы из HL в HRC и применением численных методов обработки результатов.



Рис. 9. Показания в центре образца из юбки поршня, 411HL

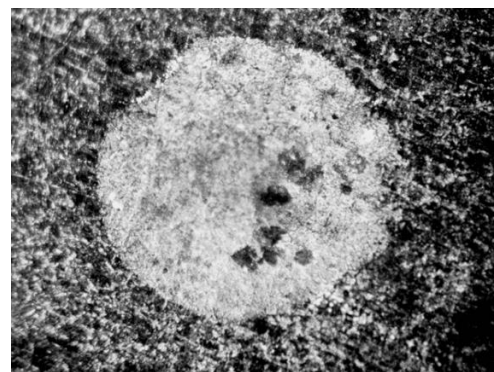


Рис. 10. Показания в центре образца из головки поршня, 470HL

Твердость образца из юбки поршня = 97,4223 HB;
Твердость образца из головки поршня = 153,15052 HB.

Данные значения наиболее близки к экспериментальным значениям твердости стали 35: от 111 до 167 HB; и стали 45: 170 HB [10].

Стоит учитывать, что поршень проработал достаточно долгое время, и после эксплуатации его твердость из-за многократного горячего отпуска могла снизиться. Поэтому, образец из юбки поршня предположительно является сталью, схожей с сталью 35, а образец из его головки – со сталью 45. Обе стали 35 и 45 относятся к углеродистым сталям с различным содержанием углерода и других легирующих элементов. Основные различия между сталью 35 и сталью 45 заключаются в следующем:

Содержание углерода: Сталь 35 содержит около 0,35% углерода, а сталь 45 содержит около 0,45% углерода. Таким образом, сталь 45 имеет более высокое содержание углерода, что способствует увеличению прочности и твердости материала.

Содержание других легирующих элементов: Обе стали содержат некоторые легирующие элементы, такие как марганец, кремний, фосфор и серу. Однако сталь 45 может содержать большее количество этих элементов, что делает ее более прочной и жесткой.

Применение: Сталь 35 и сталь 45 используются в различных областях промышленности, включая автомобильное производство, судостроение, машиностроение и т.д. Однако, из-за их различного содержания углерода и других легирующих элементов, они могут быть применены для различных целей. Например, сталь 45 может быть использована для изготовления более жестких и прочных деталей машин и оборудования.

Обработка: Из-за высокого содержания углерода и других легирующих элементов, сталь 45 более сложна в обработке, чем сталь 35. Однако за счет этого, сталь 45 может быть подвергнута термической обработке для улучшения своих механических свойств. Влияние способов обработки деталей оказывает значительное влияние на формирование механических свойств материала как на поверхности, так и внутри детали. Комбинирование методов обработки позволяет достичь технологических параметров, наиболее оптимальных в условиях эксплуатации [11, 12].

Заключение

В результате исследований:

1. Проведен анализ физической структуры отработанного стального поршня ДВС газового генератора марки JGC 624 GS-N.L производителя GE Jenbacher.

2. Создана 3D модель стального поршня с отображением нагрузок на его поверхность.

3. Согласно микроструктурному анализу, можно предположить, что в головке поршня используется сталь 45 с твердостью 470 HL (6,299 HRC, 153,15052 HB), а в юбке – сталь 35 с твердостью 411 HL (-2,846 HRC, 97,4223 HB).

Применены не все возможные методики для исследования материала поршня. Сравнительный рентгеноструктурный анализ мог бы показать фазовый состав материала и наличие остаточного аустенита в поверхностном слое, остаточные макро σ_f и микронапряжения, а также размеры областей когерентного рассеяния (D) на поверхности поршня, что позволило бы судить о степени температурных и механических воздействий на поршень в ходе эксплуатации и сравнить эти данные с результатами твердотельного геометрического моделирования [13-17].

Анализ применения современных материалов и технологий производства поршней для дизельных двигателей показывает, что поршень с наиболее оптимальной конструкцией может быть изготовлен с помощью аддитивных технологий и топологической оптимизации, основанных на расчете коэффициента запаса усталостной прочности [18]. Возможно применение материалов с различной степенью пористости в менее и более нагруженных зонах детали. В этом случае геометрическое твердотельное моделирование нагрузок, фазовый анализ, знание причин изменения микроструктуры и механических свойств позволило бы подобрать оптимальные технологии для наилучшего качества поршня. Кроме того, совместное применение этих методов позволит сконструировать поршень, а также двигатель, меньшей массы, но с неизменным или увеличенным коэффициентом запаса.

Для улучшения энергетических и экологических характеристик, достоверности расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих камеру сгорания, так же важно правильно задать локальные граничные условия со стороны рабочего тела – газа в камере сгорания судовых дизелей [19].

Литература

1. Тарасенко, Л. В. Материалы для поршневых двигателей. Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2013, 104 с.
2. Сайт компании Аскон. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <http://machinery.ascon.ru>.
3. Klimenko E, Borodina L and Rychenkova A Y 2018 Applied use of computer-aided design systems for modeling mechanisms and machines in marine transport Bull. VSAWT57pp 38–44.
4. Rychenkova A, Klimenko E and Borodina L N 2020 GEOMETRIC MODELING AND QUALITY ASSESSMENT OF THE HULL FRAME SURFACE IN COMPASS-3D CAD Russ. J. Water Transp. pp82–91.
5. A. Rychenkova, E. Klimenko, L. Borodina: Introduction of oblique sections into the curves web in modeling the framing of a vessel hull in KOMPAS-3D. Journal of Physics: Conference Series. 2032. 012142. 10.1088/1742-6596/2032/1/012142, 2021.
6. Атлас микроструктур черных и цветных металлов и сплавов: учебное наглядное пособие для студентов вузов группы специальностей 74 06 Агроинженерия. БГАТУ, Кафедра технологии металлов; [сост.: А. А. Андрушевич и др.]. Минск, 2012, 97 с.

7. Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В., Пятов И.С., Врублевская Ю.И., Финкельберг Л.А. Конструкционные материалы для поршней ДВС. Известия МГТУ. 2013, №1(15).
8. Сорокин А. А., Бородинский И. М., Дагаев А. В. Сравнительный анализ методов восстановления пропущенных данных. Известия ЮФУ. Технические науки. 2020, № 4 (214), 93-107 с.
9. Авторское свидетельство № 70734 А1 СССР, МПК F02F 3/00, F16J 1/00. Стальной поршень для двигателей внутреннего сгорания: № 10830: заявл. 08.07.1946: опубл. 01.01.1948 А. Д. Чаромский. EDN ABDDVV.
10. Металлургия. Конструкционные стали -<https://hi-intel.ru/806/12.html>
11. Сюсюка Е.Н., Блинова Т.А. Исследование зависимости структуры рабочей поверхности шестерни от способов обработки. Научное обозрение. Москва, 2014. №10, Ч. 1, 50-53 с.
12. Блинова Т.А., Сюсюка Е.Н. Влияние способов обработки на структуру поверхностного слоя шестерни. Сборник трудов Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов «Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика». Белгород. Изд-во Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015.
13. Агеева Е.В., Новиков Е.П., Пивовар Н.А. Сравнительный рентгеноструктурный анализ газодинамических покрытий головок блоков цилиндров. Известия Юго-западного государственного университета. Курск, 2018, №1 (76), 78-85 с.
14. Куприянов М.Ф., Рудская А.Г., Кофанова Н.Б., Карибов Ю.В., Разумная А.Г. Современные методы структурного анализа веществ: учебник. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009, 288 с.
15. Брандон Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М., Техносфера, 2004, 384 с.
16. Syusyuka, E. N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 июня 2021 года. Novorossiysk, Virtual, 2021, P. 012022.
17. Тихонов А.Г., Смольков П.С. Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из стали 13X15H4AM3 при продольном точении. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018, Т22. №8, 34-45 с.
18. Л. Л. Мягков, С. М. Сивачев, Е. Е. Стрижов, С. П. Чирский Топологическая оптимизация поршня высокофорсированного дизеля. Двигателестроение. 2018, № 2(272), 3-10 с.
19. Руднев, Б. И. Повалихина О. В. Численное определение полей скоростей рабочего тела в камере сгорания судового высокооборотного дизеля. Морские интеллектуальные технологии. 2020, № 4-1(50), 92-97 с.

References

1. Tarasenko, L. V. Materials for piston engines. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2013, 104 s.
2. Askon company website. [electronic resource]. URL access mode: <http://machinery.ascon.ru>
3. Klimenko E, Borodina L and Rychenkova A Y 2018 Applied use of computer-aided design systems for modeling mechanisms and machines in marine transport Bull. VSAWT57 38–44 s.
4. Rychenkova A, Klimenko E and Borodina L N 2020 GEOMETRIC MODELING AND QUALITY ASSESSMENT OF THE HULL FRAME SURFACE IN COMPASS-3D CAD Russ. J. Water Transp. 82–91 s.
5. Rychenkova, E. Klimenko, L. Borodina: Introduction of oblique sections into the curves web in modeling the framing of a vessel hull in KOMPAS-3D. Journal of Physics: Conference Series. 2032. 012142. 10.1088/1742-6596/2032/1/012142, 2021.
6. Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals and alloys: educational visual aid for university students of the specialty group 74 06 Agroengineering. BGATU, Department of Metal Technology; [comp.: A. A. Andrushevich et al.]. - Minsk, 2012, 97 s.
7. Makarov A.R., Smirnov S.V., Osokin S.V., Pyatov I.S., Vrublevskaia Yu.I., Finkelberg L.A. Construction materials for internal combustion engine pistons. Izvestiya MSTU. 2013. No. 1 (15).
8. Sorokin A. A., Borodyansky I. M., Dagaev A.V. Comparative analysis of methods of recovery of the transmitted data. News of the SFU. Technical sciences. 2020, № 4(214), 93-107 s.
9. Copyright certificate No. 70734 A1 USSR, IPC F02F 3/00, F16J 1/00. Steel piston for internal combustion engines: No. 10830: application 08.07.1946: publ. 01.01.1948. A.D. Charomsky. EDN ABDDVV.
10. Metallurgy. Structural steels -<https://hi-intel.ru/806/12.html>
11. Syusyuk E.N., Blinova T.A. Investigation of the dependence of the structure of the working surface of the gear on the processing methods. Scientific Review. Moscow, 2014, No.10, Part 1, 50-53 s.
12. Blinova T.A., Syusyuk E.N. Influence of processing methods on the structure of the surface layer of the gear. Proceedings of the All-Russian Meeting of Heads of Departments of Materials Science and Materials Technology "Interdisciplinary approaches in materials science and technology. Theory and practice". Belgorod. Publishing House Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015.
13. Ageeva E.V., Novikov E.P., Pivovarov N.A. Comparative x-ray structural analysis of gas-dynamic coatings of cylinder block heads// izvestiya Yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Kursk, 2018, №1 (76), 78-85 s.
14. Kupriyanov M.F., Rudskaya A.G., Kofanova N.B., Karibov Yu.V., Razumnaya A.G. Modern methods of structural analysis of substances: textbook. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2009. -288 s.
15. Brandon D. Microstructure of materials. Methods of research and control. M., Technosphere, 2004, 384 s.
16. Syusyuka, E. N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finish-ing. Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, June 15-16, 2021. Novorossiysk, Virtual, 2021, P. 012022.
17. Tikhonov A.G., Smolkov P.S. Investigation of residual stresses in the surface layer of 13X15H4AM3 steel parts during longitudinal turning. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2018, T22, No.8, 34-45 s.

18. Myagkov L. L., Sivachev S. M., Strizhov E. E., Chirsky S. P. Topological optimization of the piston of a high-powered diesel engine. Engine building. 2018, № 2(272), 3-10 s.
19. Rudnev, B. I. Povalikhina O. V. Numerical determination of the velocity fields of the working fluid in the combustion chamber of a ship's high-speed diesel engine. Marine intelligent technologies. 2020, № 4-1(50), 92-97 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сюсюка Елена Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика и физика», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: sollain66@rambler.ru

Elena N. Syusyuka, Ph.D. (Eng), assistant professor. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Higher Mathematics and Physics», Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin av., Novorossiysk, 353924, Russia, e-mail: sollain66@rambler.ru

Клименко Екатерина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93 e-mail: kati.klim@mail.ru

Ekaterina S. Klimenko Ph.D. (Eng), assistant professor. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Mechanics and Engineering Graphics», Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin av., Novorossiysk, 353924, Russia e-mail: kati.klim@mail.ru

Парфенов Владислав Александрович, курсант, Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93 email: vlad.parfenov.03@inbox.ru, e-mail: vlad.parfenov.03@inbox.ru

Vladislav A. Parfenov, cadet Admiral Ushakov, Maritime State University, 93 Lenin av., Novorossiysk, 353924, Russia 93 email: vlad.parfenov.03@inbox.ru

Осипенко Игорь Романович, курсант Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: igorosipenko2004@gmail.com

Igor R. Osipenko, cadet Admiral Ushakov, Maritime State University, 93 Lenin av., Novorossiysk, 353924, Russia e-mail: igorosipenko2004@gmail.com

Статья поступила в редакцию /the article was submitted 31.08.2023.

Одобрена после рецензирования /approved after reviewing 23.10.2023.

Принята к публикации /accepted for publication 24.10.2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.006>

Оптимизация параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе метода многокритериальной оптимизации

Епихин А.И.¹ bsmbeton@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Статья посвящена вопросу энергосбережения и сокращения выбросов энергетическими установками в судоходной отрасли. В процессе исследования рассмотрены особенности реализации подхода к оптимизации параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе эволюционных методов многоцелевой оптимизации. Этот метод, несмотря на номинальное сходство с подходами на основе весов, фактически может быть классифицирован как модифицированный подход субъективного компромисса, который расширяет концепцию от би-объективной до многообъективной. При необходимости он также может быть расширен таким образом, чтобы принимать входные параметры нейронной сети в виде лингвистических термов, которые впоследствии могут быть преобразованы в весовые интервалы. Отдельное внимание уделено построению и обучению нейронной сети радиального базиса. В статье проанализированы недостатки градиентного алгоритма обучения нейронной сети RBF, который базируется на минимизации целевой функции ошибки сети. Для преодоления недостатков градиентного алгоритма обучения RBF предложено использовать эволюционный алгоритм, который позволяет реализовать самообучение на основе закона биологической эволюции, в конечном итоге сходясь к наиболее адаптивной группе для получения оптимального решения или наиболее удовлетворительного решения.

Ключевые слова: судовой двигатель, оптимизация, нейронная сеть, критерии, обучение, эволюционный метод.

Для цитирования: Епихин А.И. Оптимизация параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе метода многокритериальной оптимизации, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 53—57. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.006

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.006>

Optimization of working process parameters of marine engines based on the method of multicriteria optimization

Aleksey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. This article addresses the issue of energy conservation and emissions reduction by marine power plants. The research explores the implementation of an approach to optimize the parameters of ship engines using evolutionary multi-objective optimization methods. Despite its nominal similarity to weight-based approaches, this method can be classified as a modified approach to subjective compromise, which extends the concept from bi-objective to multi-objective optimization. When necessary, it can also be extended to take input parameters of a neural network in the form of linguistic terms that can subsequently be transformed into weight intervals. Special attention is given to the construction and training of a radial basis function (RBF) neural network. The article analyzes the shortcomings of the gradient-based training algorithm for RBF neural networks, which is based on minimizing the network's error objective function. To overcome these shortcomings, the use of an evolutionary algorithm is proposed, allowing self-learning based on the principles of biological evolution, ultimately converging towards the most adaptive group to obtain the optimal or most satisfactory solution.

Keywords: ship engine, optimization, neural network, criteria, learning, evolutionary method.

For citation: Epikhin A. I. Optimization of the parameters of the working process of marine engines based on the method of multicriteria optimization, Marine intellectual technologies 2023. № 4 part 1, P. 53—57. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.006

Введение

Энергетический кризис в сочетании со все более сильным загрязнением окружающей среды подчеркивают важность энергосбережения и сокращения выбросов в судоходной отрасли. Это в

свою очередь выдвигает повышенные требования к оптимизации рабочего процесса судовых двигателей, характеризующегося несколькими десятками параметров. Как известно, оптимизация подчиняется ограничениям, которые отражают рабочие характеристики компонентов,

энергетические балансы и конфигурацию сети взаимосвязей между всеми элементами судовой энергетической установки [1]. Кроме того, задача оптимизации должна учитывать не только условия проектирования, но и множество временных интервалов, которые возникают во время движения судна. Фактически, оптимальный размер и кратность компонентов сильно зависят от типа судового двигателя, метеорологических условий, формы корпуса, характеристик силовой передачи и т.д.

В настоящее время разработано множество исследовательских подходов, позволяющих выбрать наиболее оптимальные параметры работы судового двигателя в зависимости от установленных критериев - некоторые из них касаются физических механизмов, в то время как другие имеют дело со статистическими алгоритмами. Эффективность оптимизационного решения зависит от надежности применяемых математических моделей и зависимости между переменными [2]. Большинство реальных многообъектных задач характеризуются большим пространством целей, что приводит к трудоемкому процессу оптимизации.

Цель и задачи

Для преодоления на практике обозначенных проблем широкую популярность получили методы многоцелевой оптимизации, способные решать множество реальных оптимизационных задач, поставленных в различных технологических областях. В настоящее время особенно часто используются методы Парето-оптимизации, основанные на метаэвристическом подходе Multi-Objective Meta-Heuristics. В основном это связано с их относительно коротким временем вычисления и удовлетворительным уровнем приближения к истинному Парето-фронту [3]. Среди них эволюционные методы многоцелевой оптимизации в последние два десятилетия привлекают все большее внимание. Их особенностью и преимуществом является то, что они используют нейросетевое моделирование в процессе оптимизации, чтобы уменьшить пространство задач и, таким образом, ускорить сходимость метода оптимизации.

Таким образом, рассмотрение возможностей этих методов для оптимизации параметров рабочего процесса судовых двигателей представляет собой интересное направление научного поиска, что и обуславливает выбор темы данной статьи, а также подтверждает ее практическую значимость.

Материалы и методы

Работы, в которых описывается оптимизационный подход смешанного целочисленного линейного программирования работы судовых двигателей не так часто встречаются в литературе.

Методы многокритериального синтеза топливной системы дизельного двигателя судна разрабатываются Жиленковым А. А., Абрамкиной К. В., Епифанцевым И. Р., Черным С. Г., Cao, Yan; Delpisheh, Mostafa; Yousefiasl, Saeed; Athari, Hassan.

Возможности и перспективы использования нейронных сетей глубокого обучения для оптимизации судовых операций и повышения безопасности на море нашли свое отражение в работах Куколева А. А., Пиотровского Д. Л.,

Подгорного С.А., Спицына В.В., Sadhu, Tithli; Lahiri, Sandip Kumar; Roy, Jagannath; B., Ashish.

В тоже время дискуссионными остаются вопросы, связанные с особенностями разработки искусственной нейронной сети двигателя судна с несколькими выходами для получения полной карты характеристик работы судовой энергетической установки. Также в развитии и уточнении нуждается метод моделирования отказоустойчивости судового двигателя на основе несбалансированных наборов данных с учетом многокритериальной оптимизации.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении подхода к оптимизации параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе эволюционных методов многоцелевой оптимизации.

Итак, для оптимизации параметров рабочего процесса судовых двигателей предлагаем использовать метод эволюционной многоцелевой оптимизации на основе предпочтений. Этот метод, несмотря на номинальное сходство с подходами на основе весов, фактически может быть классифицирован как модифицированный подход субъективного компромисса, который расширяет концепцию от би-объективной до многообъективной [4]. При необходимости он также может быть расширен таким образом, чтобы принимать входные параметры нейронной сети в виде лингвистических термов, которые впоследствии могут быть преобразованы в весовые интервалы.

Результаты

Блок схема метода эволюционной многоцелевой оптимизации на основе предпочтений представлена на рис. 1.



Рис. 1 Блок схема метода эволюционной многоцелевой оптимизации

Итак, обозначим заданный интервал весов, присвоенных i -му параметру оптимизации работы судового двигателя как:

$$w_i \in \langle w_i^{\min}, w_i^{\max} \rangle \quad (1)$$

где $w_i^{\min} \in (0,1)$, $w_i^{\max} \in (0,1)$ и $w_i^{\min} \leq w_i^{\max}$.

С учетом выше представленного уравнения предлагаем использовать следующую обобщенную средневзвешенную целевую функцию:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (2)$$

где n - число параметров оптимизации, а каждая $f_i(x)$ - нормированная объективная функция, которая возвращает значения из диапазона $\langle 0, 1 \rangle$.

В данном случае необходимо отметить, что каждый w_i остается неопределенным значением из диапазона $\langle w_i^{\min}, w_i^{\max} \rangle$. Поэтому $\sum_{i=1}^n w_i$ не всегда равно единице. Вместо этого, оно может быть любым числом между нулем и n . Что касается функции $f_i(x)$, предполагается, что ее значения находятся в диапазоне $(0, 1)$ до начала эволюционных операций. Очень важно использовать нормализованные объективные функции, поскольку в противном случае весовые интервалы не будут действительно отражать оптимизированные параметры. Поэтому на практике рекомендуется нормализовать значения функций во время каждого поколения эволюционного алгоритма [5]. Также важно минимизировать потерю информации, вызванную нормализацией (Min-Max Feature Scaling может быть нежелательным, поскольку он всегда охватывает весь диапазон $\langle 0, 1 \rangle$, даже если предварительно нормализованные значения близки друг к другу).

Для обобщенной средневзвешенной функции всегда выполняется следующее условие:

$$\sum_{i=1}^n w_i^{\min} f_i(x) \leq f(x) \leq \sum_{i=1}^n w_i^{\max} f_i(x) \quad (3)$$

В многокритериальной минимизации Парето x доминирует над y тогда и только тогда, когда:

$$\exists_i (f_i(x) < f_i(y)) \text{ и } \forall_i (f_i(x) \leq f_i(y)) \quad (4)$$

Для предложенной обобщенной средневзвешенной объективной функции вышеприведенное правило по-прежнему выполняется в том смысле, что оно подразумевает доминирование. Однако, если оно не выполняется и x не доминирует над y , расширенное отношение доминирования на основе весового интервала может быть использовано вместо доминирования по Парето путем проверки следующего условия:

$$f(x) < f(y) \quad (5)$$

где $f()$ – обобщенная средневзвешенная функция.

Проверить, верно ли выше представленное выражение, напрямую нельзя, поскольку каждый w_i остается неопределенным значением из $\langle w_i^{\min}, w_i^{\max} \rangle$ диапазона. Однако, можно показать, что это уравнение всегда верно, если верно следующее:

$$\sum_{i=1}^n g_i(x, y) > 0 \quad (6)$$

$$\text{где } g_i(x, y) = \begin{cases} w_i^{\min} (f_i(y) < f_i(x)), & \text{для } f_i(y) - f_i(x) \geq 0 \\ w_i^{\max} (f_i(y) < f_i(x)), & \text{для } f_i(y) - f_i(x) < 0 \end{cases}$$

Ключевым вопросом успеха использования метода эволюционной многоцелевой оптимизации на основе предпочтений является выбор эффективного способа построения приближенной модели судового двигателя. Для этого в алгоритме предусмотрено создание нейронной сети с функциями активации радиального базиса (см. рис. 2).

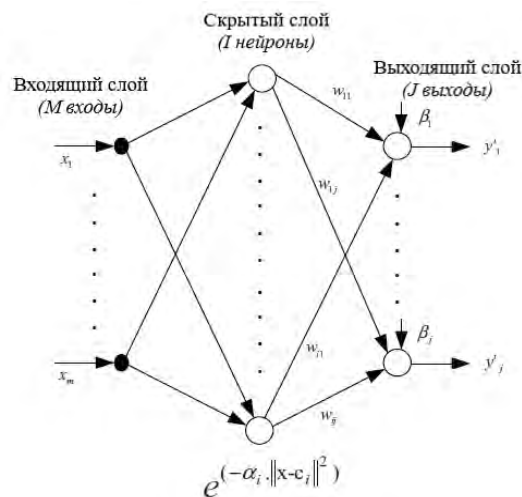


Рис. 2 Схема RBF-сети

Для обучения нейронной сети RBF традиционно используется градиентный алгоритм, который базируется на минимизации целевой функции ошибки сети. Однако для задач многокритериальной оптимизации он имеет ряд существенных недостатков.

1. В алгоритме отсутствуют правила для начального определения числа элементов сети и их параметров. Также нет четкого порядка изменения количества элементов в процессе обучения.

2. Когда сеть обучается, изменяются все ее части, соответственно при увеличении количества элементов сети, расходы, связанные с обучением, также возрастают.

3. Когда есть элементы с близкими значениями координат центров и ширины радиальной функции, нейронная сеть не может достичь устойчивого состояния в процессе обучения.

Таким образом, для решения обозначенных недостатков представляется целесообразным использовать эволюционный алгоритм обучения, который позволяет реализовать самообучение на основе закона биологической эволюции, в конечном итоге сходясь к наиболее адаптивной группе для получения оптимального решения или наиболее удовлетворительного решения. Эволюционный алгоритм применяется для определения весовых параметров соединения RBF-сети. Процесс оптимизации нейронной сети RBF с использованием эволюционного алгоритма показан на рисунке 3.

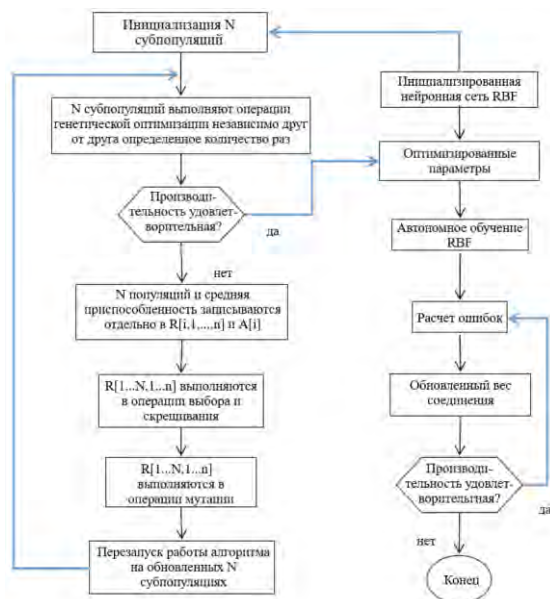


Рис. 3 Процесс оптимизации нейронной сети с помощью эволюционного алгоритма

Представленный на рис. 3 процесс оптимизации предполагает прохождение следующих шагов:

Шаг 1: N субпопуляций инициализируются, а начальные параметры сети (веса соединений, ширина центра и значение центра гауссовой функции) кодируются в виде генов.

Шаг 2: N субпопуляций выполняют эволюционные операции независимо друг от друга.

Шаг 3: Оценка эффективности. Если результаты неудовлетворительные, то осуществляется переход к следующему шагу. Если результаты устраивают, то следующим этапом является обучение RBF, которое включается в себя:

- автономное обучение RBF-сети;
- вычисление абсолютной ошибки;
- обновление параметров.

Повторная оценка эффективности. Если результат удовлетворяет, то процесс оптимизации завершен, если нет, то осуществляется переход к автономному обучению и вычислению ошибок.

Шаг 4: Рассчитывается средняя приспособленность N субпопуляций.

Шаг 5: Операции выбора и скрещивания выполняются отдельно.

Шаг 6: Операции мутации выполняются отдельно.

Шаг 7: Новые N субпопуляции пересчитываются и осуществляется возврат к шагу 2.

Выводы

Таким образом, в статье описаны особенности использования эволюционных методов многоцелевой оптимизации для достижения оптимальных параметров рабочего процесса судовых двигателей. Отдельное внимание в процессе исследования уделено построению и обучению нейронной сети радиального базиса на основе эволюционного алгоритма.

Литература

1. Wang, Kai Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping. Energy: the international journal. 2022. Volume 245; pp 23-29.
2. Tran, Tien Anh Effect of ship loading on marine diesel engine fuel consumption for bulk carriers based on the fuzzy clustering method. Ocean engineering. 2020. Volume 207; pp 98-104.
3. Zhao, Jiaqi Multiobjective optimization of classifiers by means of 3D convex-hull-based evolutionary algorithms. Information sciences. 2016. Volume 367/368; pp 80-104.
4. Moya, Ignacio A multicriteria integral framework for agent-based model calibration using evolutionary multiobjective optimization and network-based visualization. Decision support systems. 2019. Volume 124.
5. Zhang, HongGuang MCDMSR: multicriteria decision making selection/replacement based on agility strategy for real optimization problems. Applied intelligence. 2019. Volume 49: Number 8; pp 2918-2941.
6. Кондратьев С. И., Починков Р. А. Гидродинамика управляемого движения судна: учебное пособие. Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Морская гос. акад. им. адмирала Ф. Ф. Ушакова". Новороссийск: МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2008. 76 с. EDN QNVEPZ.
7. Кондратьев С. И. Основные принципы оптимизации движения крупнотоннажных судов методами математического моделирования. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2003. № 5. С. 27-30. EDN SMVTQN.
8. Патент № 2678762 С1 Российская Федерация, МПК В63Н 25/00. Способ и система контроля местоположения судна с помощью нечеткой логики: № 2018105412: заявл. 13.02.2018; опубл. 31.01.2019 С. И. Кондратьев, Д. Е. Студеникин, М. Л. Джавукцян, В. В. Глимбоцкий ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова". EDN ZDWMYP.

References

1. Wang, Kai Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping. Energy: the international journal. 2022. Volume 245; pp 23-29.
2. Tran, Tien Anh Effect of ship loading on marine diesel engine fuel consumption for bulk carriers based on the fuzzy clustering method. Ocean engineering. 2020. Volume 207; pp 98-104.
3. Zhao, Jiaqi Multiobjective optimization of classifiers by means of 3D convex-hull-based evolutionary algorithms // Information sciences. 2016. Volume 367/368; pp 80-104.
4. Moya, Ignacio A multicriteria integral framework for agent-based model calibration using evolutionary multiobjective optimization and network-based visualization // Decision support systems. 2019. Volume 124.
5. Zhang, HongGuang MCDMSR: multicriteria decision making selection/replacement based on agility strategy for real optimization problems. Applied intelligence. 2019. Volume 49: Number 8; pp 2918-2941.

6. Kondrat'yev S. I., Pochinkov R. A. Gidrodinamika upravlyayemogo dvizheniya sudna [Hydrodynamics of controlled motion of a vessel], uchebnoye posobie, Federal'noye gos. obrazovatel'noye uchrezhdeniye vyssh. prof. obrazovaniya "Morskaya gos. akad. im. admirala F. F. Ushakova". Novorossiysk : MGA im. adm. F. F. Ushakova, 2008. 76 s. EDN QNVEPZ.
7. Kondrat'yev S. I. Osnovnyye printsipy optimizatsii dvizheniya krupnotonnazhnykh sudov metodami matematicheskogo modelirovaniya [Basic principles of optimizing the movement of large-tonnage vessels by methods of mathematical modeling]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki. 2003. № S. S. 27-30. EDN SMVTQN.
8. Patent № 2678762 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B63H 25/00. Sposob i sistema kontrolya mestopolozheniya sudna s pomoshch'yu nechetkoy logiki [Method and system for monitoring the position of a ship using fuzzy logic]. № 2018105412: zayavl. 13.02.2018: opubl. 31.01.2019 S. I. Kondrat'yev, D. Ye. Studenikin, M. L. Dzhavuktsyan, V. V. Glimbolskiy; zayavitel' Federal'noye gosudarstvennoye byudzhethnoye obrazovatel'noye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya "Gosudarstvennyy morskoy universitet imeni admirala F.F. Ushakova". EDN ZDWMYP

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Епихин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственной морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Alexey I. Epikhin, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department "Operation of Ship Mechanical Installations", Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.09.2023.

Научная статья

УДК 621.515.001.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.007>

Влияние относительной высоты рабочих лопаток на эффективность ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса

Крюков А.А.¹ aleksey902@mail.ru, Чехранов С.В.¹ turboroom@yandex.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В данной работе рассматриваются два исследования: проверочное и действительное. В первом исследовании моделируется течение потока в центростремительной малорасходной полноподводной турбине с различным значением относительной высоты рабочей лопатки. При достижении оптимального значения относительной величины наблюдается максимальное значение коэффициента скорости рабочего колеса и коэффициента полезного действия ступени в целом. Это соответствует основным законам газодинамики и теории турбин, что проверяет целесообразность и объективность применения численного метода исследования в турбинных ступенях данного типа. Во втором исследовании рассматривается течения потока в ступени центростремительной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса при различных значениях относительной высоты рабочих лопаток. В исследовании наблюдается повышение эффективности ступени и увеличение коэффициента скорости рабочего колеса по мере увеличения относительной высоты. Повышение эффективности продолжается и после преодоления оптимума определённого в первом исследовании. Это объясняется увеличением площади облопачивания рабочего колеса, как и при увеличении парциальности ступени. При этом снижается доля утечек и увеличивается коэффициент скорости рабочего колеса. Коэффициенты скорости соплового аппарата при конструктивных изменениях остаются постоянными. Данное конструктивное изменение позволяет повысить эффективность ступени и совершенствовать проточную часть ступени центростремительной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Ключевые слова: малорасходные турбины, сопловой аппарат, рабочее колесо, степень парциальности, численный эксперимент, расчетная сетка, коэффициент скорости, моделирование

Для цитирования: Крюков А.А., Чехранов С.В. Влияние относительной высоты рабочих лопаток на эффективность ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 58—63. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.007

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.007>

The effect of the relative height of the working blades on the efficiency of the inflow turbine with partial blading of the runner

Aleksey A. Kryukov¹ aleksey902@mail.ru, Sergei V. Chekhranov¹ turboroom@yandex.ru¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. In this paper, two studies are considered: verification and valid. In the first study, the flow in a low-consumption inflow full-drive turbine with a different value of the relative height of the working blade is modeled. When the optimal value of the relative value is reached, the maximum value of the speed coefficient of the runner and the efficiency coefficient of the stage as a whole is observed. This corresponds to the basic laws of gas dynamics and turbine theory, which verifies the feasibility and objectivity of applying the numerical method of investigation in turbine stages of this type. In the second study, the flow in the stage of a inflow turbine with partial blading of the runner is considered at different values of the relative height of the working blades. The study shows an increase in the efficiency of the stage and an increase in the coefficient of speed of the runner as the relative height increases. The increase in efficiency continues even after overcoming the optimum determined in the first study. This is due to an increase in the area of the runner's flapping, as well as with an increase in the stage's partiality. At the same time, the proportion of leaks decreases and the speed coefficient of the runner increases. The velocity coefficient of the nozzle diaphragms remains constant during structural changes. This design change makes it possible to increase the efficiency of the stage and improve the flow part of the stage of a low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner.

Key words: low-consumption turbines, nozzle diaphragm, runner, admission intensity, numerical experiment, computational mesh, velocity coefficients, simulation

For citation: Aleksey A. Kryukov, Sergei V. Chekhranov The effect of the relative height of the working blades on the efficiency of the inflow turbine with partial blading of the runner Marine intellectual technologies 2023. № 4 part 1, P. 58—63. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.007

Введение

Малорасходные турбины широко применяются в различных областях современной техники. Значительный объем применяемых малорасходных турбин являются парциальными.

Стремление снизить потери от парциальности в МРТ привело к появлению различных конструкций турбинных ступеней. Применение безвентиляционных ступеней, позволяет значительно снизить потери от парциальности под воздействием изменения конструктивных параметров. Представителями таких ступеней являются: турбины конструкции ЛПИ [1] и турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса (РК) [2].

Объект исследования – проточная часть малорасходной центростремительной турбины с частичным облопачиванием РК.

Предмет исследования – газодинамические и геометрические характеристики соплового аппарата (СА) и РК малорасходной центростремительной турбины.

Метод исследования – численное моделирование течения газа.

Цель исследования – определить влияние относительной высоты рабочей лопатки на эффективность турбины с частичным облопачиванием РК.

Анализ влияния конструктивных факторов на работу ступени

На рис. 1 видно, что рабочие лопатки располагаются только на части окружности рабочего колеса, образующей активную дугу впуска рабочего тела, а место неактивной дуги занято металлическим телом диска.

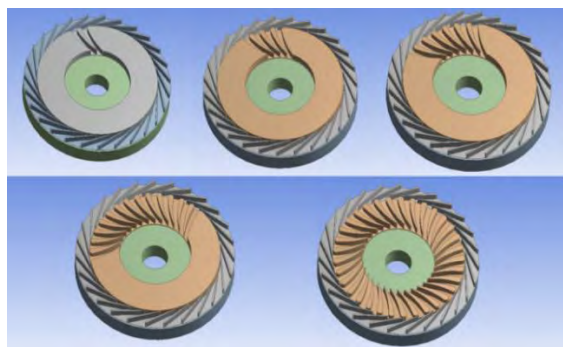


Рис. 1. Исследуемая турбинная ступень.

В этой турбине газ поступает по всей окружности соплового аппарата (СА). В сопловых каналах, которые находятся напротив активной дуги рабочего колеса, течение газа происходит, как и в традиционных турбинах. А в сопловых каналах, которые расположены напротив металлического диска РК, течение газа резко снижено. При этом, сопловые каналы не заперты полностью, так как между СА и РК существует межлопаточный зазор, и поэтому некоторое количество рабочего тела все равно будет через него течь.

Еще одной характерной особенностью описываемой турбинной ступени является работа сопловых каналов в процессе вращения РК. На рис. 1 рабочее колесо вращается против часовой стрелки, поэтому сопловые каналы слева от облопаченной

части рабочего колеса открываются, попадая в активную зону, а сопловые каналы, расположенные справа от активной дуги, закрываются по мере углового перемещения этой дуги.

Методы и материалы численного эксперимента

Инновационных методов исследования ступеней данного типа является замена физического эксперимента численным. Применяя, средства вычислительной газодинамики для создания расчетной модели турбинной ступени, определения выходных параметров проточной части турбины и визуализация структуры потока, позволяет сформировать адекватную оценку процессам, протекающим в ступени. Геометрические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики малорасходной центростремительной турбины

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Угол наклона сопел, α_1	16,31 °	Высота лопатки РК вход, l_{p1}	2,81 мм
			3,29 мм
			3,96 мм
			4,32 мм
Высота сопловой лопатки, l_c	2,53 мм	Высота лопатки РК выход, l_{p2}	3,70 мм
			4,30 мм
			4,70 мм
			5,10 мм
Шаг сопел, t_{CA}	5,88 мм	Ширина горла, a_2	1,5 мм
Ширина горла, a_1	1,45 мм	Шаг лопаток РК, t_{RK}	2,54 мм
Кол-во сопловых лопаток, z_1	27	Наружный диаметр РК, D_H	50 мм
Угол входа потока в РК, β_1	90°	Угол выхода потока в РК, β_2	42°

Для определения граничных условий были рассмотрены работы отечественных исследователей [3], [4], [5], [6] в данной области, и, адаптируя под свои исходные параметры, определены обобщенные условия эксперимента:

- давление газа на входе в СА $P_0^*=0,2$ МПа;
- температура на входе в СА $T_0^*=293$ К;
- давление на выходе из РК $P_2=0,1$ МПа;
- диапазон частоты вращения РК $(20 \div 100) \times 10^3$ мин⁻¹.
- газовая постоянная $R=287$ Дж/кг·К;
- показатель адиабаты $k=1,4$.

Расчетная сетка неструктурированная. Параметр y^+ , для данного исследования должен лежать в пределах $1 < y^+ \leq 5$.

Модель турбулентности для выбранного исследования применяется SST, как наиболее подходящая. Для достижения высокой степени достоверности результатов моделирования, при использовании не чрезмерно высоких ресурсов вычислительной техники, применяется нестационарная модель URANS. Выше изложенные критерии, требования и граничные условия так же применялись в зарубежной литературе [7], [8], [9], [10], [11].

Проведение проверочного численного эксперимента

В первом эксперименте исследуются четыре полноподводные ступени с различным значением относительной высоты рабочей лопатки. Величина φ показана на рисунке 2.

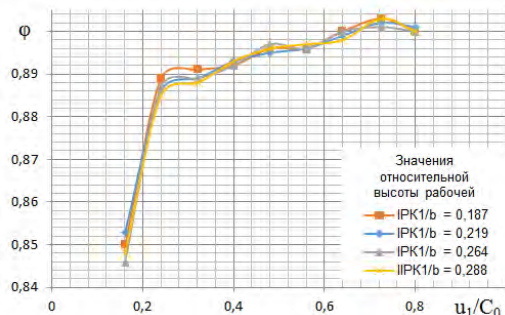


Рис. 2. График зависимости φ от u_1/C_0 полноподводной турбины

Из графика видно, что геометрические изменения в рабочем колесе, не влияют на потери в сопловом аппарате. Коэффициент скорости СА во всех ступенях находится в диапазоне погрешности эксперимента. Величина ψ показаны на рисунке 3.

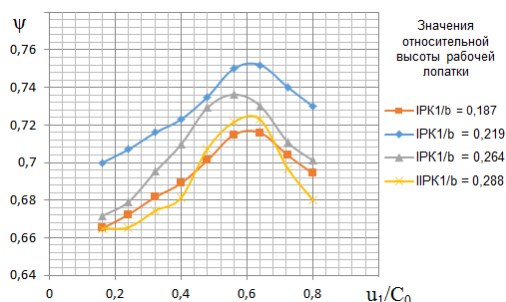


Рис. 3. График зависимости ψ от u_1/C_0 полноподводной турбины

Из рисунка 3 видно, что изменения относительной высоты рабочих лопаток оказывает существенное влияние на потери в РК. Коэффициент скорости РК имеет наибольшее значение при относительной высоте лопатки – 3,29 мм. Дальнейшее увеличение высоты лопатки вызывает повышение концевых потерь $\zeta_{\text{конц}}$, которые обусловлены потерями на трение в пограничном слое на межлопаточных поверхностях и образованием вторичных течений у концов лопаток.

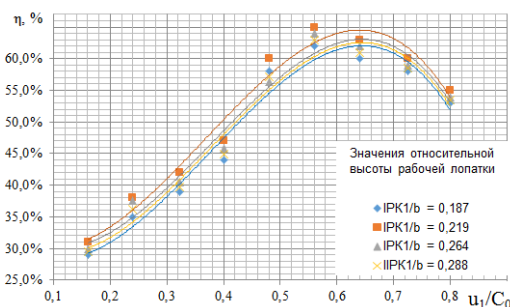


Рис. 4. График зависимости коэффициента полезного действия ступени от u_1/C_0 полноподводной турбины

На рисунке 4 видно, что изменения значений коэффициента полезного действия напрямую зависит от коэффициента скорости РК. При относительно постоянном значении φ , значение ψ достигает своего максимального значения при оптимальном значении IP_1/b .

Данный эксперимент соответствует современному представлению физики процесса течения рабочего тела и подтверждается законам газовой динамики и теории турбин.

Проведение действительного численного эксперимента

Во втором численном эксперименте рассматривается турбинная ступень с наименьшей степенью парциальности. На рис. 5-8 показаны поля скорости проточной части со степенью парциальности $\epsilon=0,059$ при различной высоте лопаток РК.

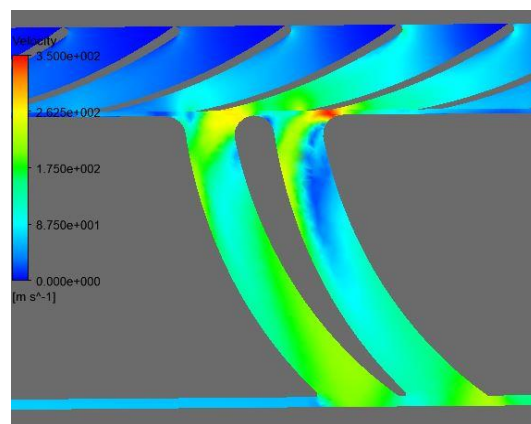


Рис. 5. Поле скорости при $IPK1/b = 0,187$

Во всех четырех ступенях, через неактивные сопла осуществляется подсос рабочего тела в межвенечный зазор. Процессы протекающие в этом эксперименте схожи с процессами протекающими в исследовании [7], что подтверждается проведенным исследованием.

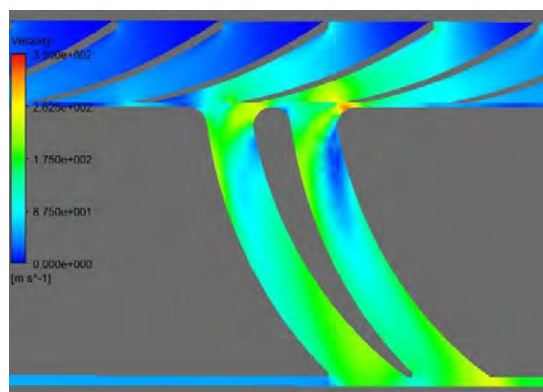
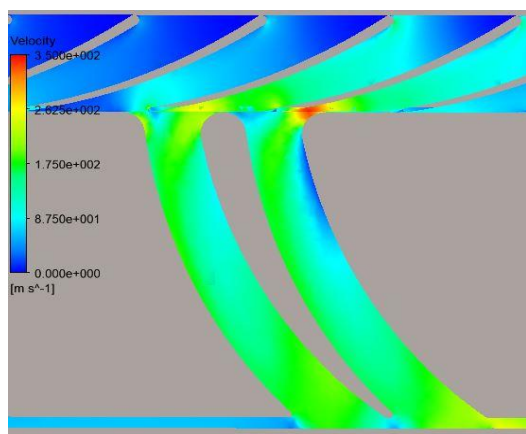
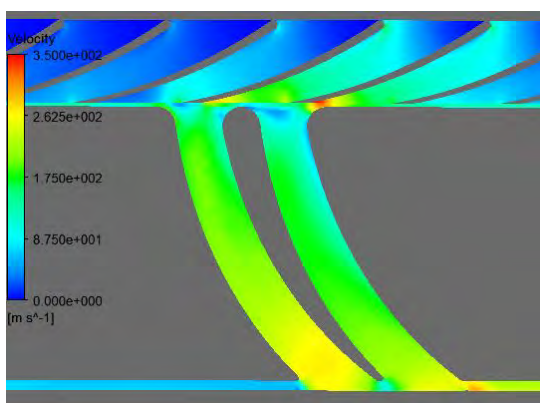


Рис. 6. Поле скорости при $IPK1/b = 0,219$

Дополнительное преобразование потенциальной энергии газа в кинетическую энергию потока на рабочих лопатках. Это подтверждается более «теплой» гаммой полей скоростей с более высоким значением относительной высоты рабочей лопатки.

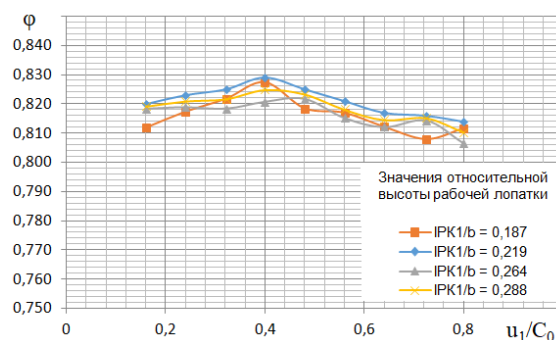

 Рис. 7. Поле скорости при $IPK1/b = 0,264$

 Рис. 8. Поле скорости при $IPK1/b = 0,288$

С увеличением относительной высоты рабочих лопаток в рабочих каналах наблюдается схожая картина течения газа с образованием вихря, но он значительно слабее. Причина этому является стремительное понижение давления за входными кромками рабочих лопаток. Это объясняется тем, что рабочее тело, проходя из более узкого сечения соплового канала, поступает в более широкое сечение между входными кромками рабочих лопаток. При этом происходит падение давления, и как следствие

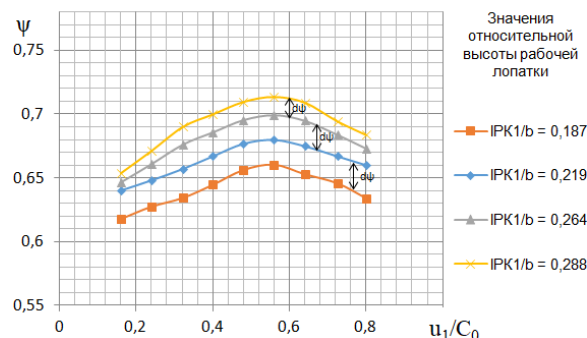
Схожий процесс может происходить при увеличении шага рабочей лопатки. В этом случае так же рабочее тело проходит через значительно более узкое сечение соплового канала, и поступает в более широкое сечение между входными кромками рабочих лопаток. Но в этом случае размер рабочих каналов увеличивается, а следовательно увеличивается степень парциальности ϵ . Коэффициент скорости рабочего колеса ψ и коэффициент полезного действия ступени так же возрастает вслед за увеличением степени парциальности ϵ .

В рассматриваемом случае парциальность остается постоянной, но при этом площадь входной плоскости увеличивается как и в случае с увеличением шага рабочей лопатки. Так же снижаются утечки газа через уплотнение.

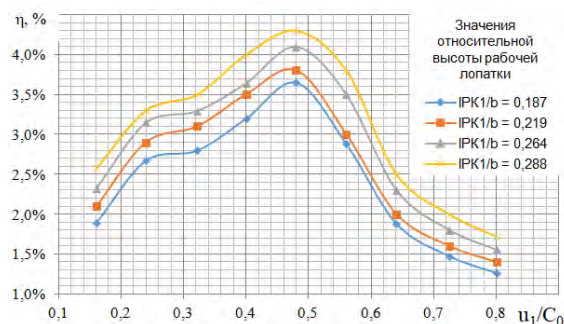
На рис. 9 представлены графики зависимости фот u_1/C_0 . Из них следует, что данное конструктивное изменение существенно не влияет на значение коэффициента скорости ϕ .


 Рис. 9. График зависимости ϕ от u_1/C_0

На рис. 10 представлены графики зависимости коэффициента скорости рабочего колеса от u_1/C_0 . На графиках видна закономерность по увеличению коэффициента скорости рабочего колеса вслед за повышением значения относительной высоты рабочих лопаток. Так же, в графиках можно заметить постепенное уменьшение градиента коэффициента скорости рабочего колеса $d\psi$. Это свидетельствует о приближении оптимального значения относительной высоты лопатки.


 Рис. 10. График зависимости ψ от u_1/C_0

На рис. 11 представлены графики зависимости коэффициента полезного действия ступени от u_1/C_0 . Из графиков видно, что наивысшее значение КПД имеет ступень с наибольшим значением относительной высоты рабочей лопатки. Это объясняется существенным влиянием ψ на эффективность турбины. По достижению оптимального значения ψ , возрастают концевые потери в рабочем колесе, в виду образования застойных зон у поверхности крышки рабочего колеса.


 Рис. 11. График зависимости коэффициента полезного действия ступени от u_1/C_0

В отличие от традиционных турбинных ступеней оптимальное значение возникает при более высоком значении относительной высоты, что будет сказываться на результирующих значениях коэффициента скорости РК и коэффициента полезного действия.

Заключение

По результатам численного исследования получены следующие выводы:

– при проведении проверочного эксперимента, подтверждена целесообразность применения численного метода для получения

значений скоростных и интегральных характеристик ступени;

– получены значения φ в диапазоне относительной высоты рабочей лопатки $l_{PK1}/b = 0,187 \div 0,288$;

– увеличение относительной высоты рабочей лопатки приводит к уменьшению профильных потерь, что увеличивает значения ψ ;

– анализ эффективности исследуемых ступеней показывает, что наибольшее значения внутреннего КПД будет иметь ступень с относительной высотой рабочей лопатки $l_{PK1}/b = 0,288$, и составит 4,28%.

Литература

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161;
2. Чехранов С.В. Экспериментальное исследование радиальных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса Transport business in Russia, № 6, 2015, с. 280-284;
3. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.
4. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин, Г. Л. Раков, В. А. Рассохин, А. А. Себелев, М. В. Смирнов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.
5. Крюков, А. А. Влияния угла наклона сопел на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 1. — С. 23-29. — DOI 10.24143/2073-1574-2023-1-23-29.
6. Крюков, А. А. Влияния шага сопловой лопатки на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Т. 15, № 1. — С. 73-81. — DOI 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81.
7. Крюков А. А. Численное исследование течения потока в ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4-1 (50). — С. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.
8. Kryukov A. A. Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner / A. A. Kryukov, G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, R. R. Simashov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 986. — Is. 1. — Pp. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.
9. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.
10. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyayev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.
11. Smirnov M.V. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017-100.

References

1. Rassokhin, V.A. Turbiny konstrukcii LPI: Preimushhestva, harakteristiki, opyt razrabotki i primeneniye. [Design turbines of LPI: Advantages, characteristics, development experience and application] Trudy SP6GPU. 2004. № 491. С. 152-161;
2. Chehranov S.V. Jeksperimental'noe issledovanie radial'nyh turbin s chastichnym oblopachivaniem rabocheho koleasa [Field research of radial flow turbines having partially bladed wheel rotor] Transport business in Russia, № 6, 2015, s. 280-284;
3. Epifanov A. A. Raschet trekhmernogo techeniya v stupenyah maloraskhodnyh turbin / A. A. Epifanov, A. I. Kirillov, V. A. Rassokhin // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo poli-tehnicheskogo universiteta. — 2012. — № 1 (142). — S. 65–70.

4. Zabelin N. A. Issledovanie osobennostej techeniya v maloraskhodnyh turbinnyh stupenyah konstrukcii LPI / N. A. Zabelin, G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, M. V. Smirnov // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. — 2013. — № 1 (166). — S. 45–53.
5. Kryukov, A. A. Vliyaniya ugla naklona sopel na koefficient skorosti centrostremitel'noj turbiny s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola / A. A. Kryukov // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. — 2023. — № 1. — S. 23-29. — DOI 10.24143/2073-1574-2023-1-23-29.
6. Kryukov, A. A. Vliyaniya shaga soplovoj lopatki na koefficient skorosti centrostremitel'noj turbiny s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola / A. A. Kryukov // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. — 2023. — T. 15, № 1. — S. 73-81. — DOI 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81.
7. Kryukov A. A. CHislennoe issledovanie techeniya potoka v stupeni centrostremitel'noj turbiny s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola / A. A. Kryukov, S. V. Chekhranov // Morskie intellektual'nye tekhnologii. — 2020. — № 4-1 (50). — S. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.
8. Kryukov A. A. Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner / A. A. Kryukov, G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, R. R. Simashov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 986. — Is. 1. — Pp. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.
9. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.
10. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyaev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.
11. Smirnov M.V. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017-100.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крюков Алексей Алексеевич, старший преподаватель кафедры Инженерных дисциплин, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: aleksey902@mail.ru

Aleksey A. Kryukov, Senior lecturer of Department of Engineering disciplines Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok 690087, Russian Federation e-mail: aleksey902@mail.ru

Чехранов Сергей Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52-б, e-mail: turboroom@yandex.ru

Sergei V. Chekhranov, doctor of technical Sciences, 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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.08.2023.

Научная статья

УДК 629.5.00

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.008>

К вопросу о качественной и количественной оценке технического состояния элементов системы наддува судовых высокооборотных двигателей в эксплуатации

Герасиди В.В.¹ gerasidi@rambler.ru, Лисаченко А.В.¹ alexh.liss@yandex.ru

¹Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В работе выполнен анализ качественной и количественной оценки технического состояния элементов системы наддува главных высокооборотных двигателей судов вспомогательного флота в эксплуатации. В основу качественного и количественного анализа входили косвенные методы оценки технического состояния деталей двигателей, которые являются существенным дополнением методов механических измерений и эксплуатационных наблюдений и способствуют скорейшему решению задач планирования в части экономически обоснованного вывода механизмов в ремонт. В методику экспериментального исследования входило применение современных диагностических комплексов, измерительных приборов, статистический анализ полученных данных и их визуализация при помощи высокоуровневого языка программирования Пайтон (Python). Выполненные исследования позволили создать регрессионную математическую модель количественной и качественной оценки влияния теплофизических и вибрационных параметров на техническое состояние элементов системы наддува двигателей. Проводимые исследования показали, что выбранные методы, параметры неразрушающего контроля и их значения позволяют косвенно характеризовать техническое состояние элементов системы наддува исследуемых двигателей.

Проводимые исследования судовых энергетических установок, на основе применения безразборных методов диагностики морских судов в эксплуатации, лежат в основе системы управления автономных судов.

Ключевые слова: высокооборотный двигатель, анализ, косвенный метод, теплофизические и вибрационные параметры, техническое состояние, турбокомпрессор, диагностические признаки.

Благодарности: авторы выражают благодарность судовым компаниям Азово-Черноморского побережья за возможность проведения исследований технической эксплуатации двигателей фирмы "Caterpillar".

Для цитирования: Герасиди В.В., Лисаченко А.В. К вопросу о качественной и количественной оценке технического состояния элементов системы наддува судовых высокооборотных двигателей в эксплуатации, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 64—71. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.008

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.008>

On the issue of qualitative and quantitative assessment of the technical condition of the elements of the pressurization system of marine high-speed engines in operation

Viktor V. Gerasidi¹ gerasidi@rambler.ru, Aleksey V. Lisachenko¹ alexh.liss@yandex.ru

¹Admiral Ushakov State Maritime University, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes the qualitative and quantitative assessment of the technical condition of the elements of the pressurization system of the ship's main high-speed engines in the operation of auxiliary fleet vessels. The qualitative and quantitative analysis was based on indirect methods for assessing the technical condition of engine parts, which are a significant addition to the methods of mechanical measurements and operational observations and contribute to the speedy solution of planning tasks in terms of economically justified withdrawal of mechanisms for repair. The experimental research methodology included the use of modern diagnostic complexes, measuring instruments, statistical analysis of the data obtained and their visualization using the high-level Python programming language. The performed studies allowed us to create a regression mathematical model for quantitative and qualitative assessment of the influence of thermophysical and vibration parameters on the technical condition of the elements of the engine boost system. The conducted studies have shown that the selected methods, parameters of non-destructive testing and their values allow us to indirectly characterize the technical condition of the elements of the boost system of the engines under study. The ongoing research of marine power plants, based on the use of non-selective methods of diagnostics of marine vessels in operation, are the basis of the control system of autonomous vessels

Key words: high-speed engine, analysis, indirect method, thermophysical and vibration parameters, technical condition, turbocharger, diagnostic signs.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the ship companies of the Azov-Black Sea coast for the opportunity to conduct research on the technical operation of Caterpillar engines.

For citation: Viktor V. Gerasidi, Aleksey V. Lisachenko, On the issue of qualitative and quantitative assessment of the technical condition of the elements of the pressurization system of marine high-speed engines in operation, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 64—71. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.008

Введение

Техническая диагностика играет существенную роль в определении рабочего состояния судовых механизмов в процессе эксплуатации. Для более эффективной процедуры диагностирования необходимо провести исследования, включающие: характерные неисправности, повреждения, отказы элементов, деталей, узлов объекта исследования, изучить и разделить диагностические признаки; разработать контролируемые параметры системы мониторинга, основывающихся на методах неразрушающего контроля [1].

Эксплуатация судовых, современных электронно-управляемых высокооборотных двигателей (ВОД^е) включает в себя контроль технического состояния и проведение теплотехнических испытаний по теплофизическим параметрам, полученным от датчиков штатной системы диагностики и управления двигателем.

Разработка и использование методов и средств диагностики должна лежать в основе технической эксплуатации современных ВОД^е. Однако, развитие методов и средств технической диагностики, а также практическая реализация диагностического обслуживания на основе информации о контроле технического состояния, невозможны без предварительной организации мониторинга технического состояния. В практике организации эксплуатации ВОД^е является разработка нормативных значений и установление соответствия между механическим состоянием и состоянием двигателя по результатам контроля теплофизических параметров, как независимо от конкретных причин изменения механического состояния, так и в тех случаях, когда такие причины известны. Косвенные методы являются существенным дополнением метода механических измерений и эксплуатационных наблюдений и способствуют скорейшему решению задач планирования в части экономически обоснованного вывода механизмов в ремонт [1].

Объекты экспериментального исследования

Электронно-управляемые (ЭУ) ВОД фирмы "Caterpillar" модели CAT 3516B устанавливаются в качестве главных двигателей на морских буксирах с винторулевыми колонками (таблица 1). Двигатели отвечают нормам Tier 3 и Stage IIIA по токсичности отработавших газов благодаря использованию технологии ACERT (Advanced Combustion Emissions Reduction Technology), охватывающая четыре системы для снижения токсичности отработавших газов и затрагивает топливную систему, процесс сгорания топлива, систему поступления в двигатель чистого воздуха и внедрение системы электронного контроля и управления.

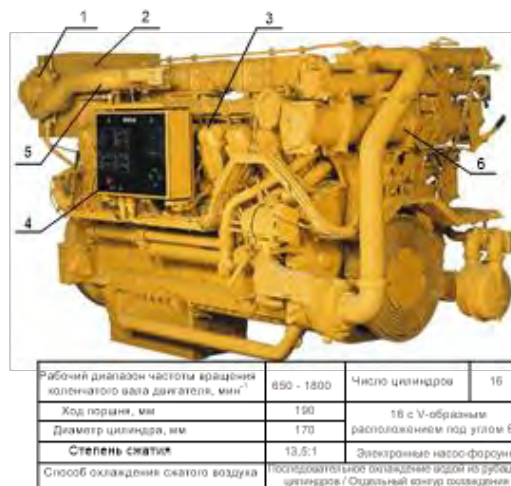


Рис. 1. Высокооборотный двигатель фирмы "Caterpillar" марки CAT3516B

1- турбокомпрессор; 2- выход отработавших газов; 3- крышка цилиндров; 4- панель управления; 5- воздушный коллектор; 6- корпус масляного фильтра

Системы наддува

В состав системы наддува V-образного дизеля «Caterpillar» CAT 3516B (рисунок 2) входят два охлаждаемых турбокомпрессора 2, 3 (ТК) с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха 9, работающих на общий ресивер 8. Отработавшие газы через соответствующие выхлопные коллекторы правого и левого бортов двигателя попадают на лопатки турбины ТК правого и левого бортов, раскручивая их, выходят через общий выхлопной коллектор в атмосферу. Двигатель работает в широком диапазоне изменения нагрузок. Для раскрутки каждого ТК необходима достаточная энергия отработавших газов, которая возникает при достижении частоты вращения коленчатого вала двигателя равной 1100 - 1200 мин⁻¹ и выше, при нагрузке более 15 – 30% N_{ном}. Это означает работу двигателя уже не на холостом ходу, а при частичной нагрузке.

В режиме прогрева двигателя при 650 мин⁻¹ (при малых нагрузках до 8% N_{ном}) давление наддувочного воздуха в ресивере практически отсутствует.

Турбокомпрессоры фирмы CAT

Особенностью конструкции ТК «CAT» являются подшипники скольжения и гидродинамический подпятник, которые смазываются под давлением от масляной системы двигателя (рисунок 3). Корпус ТК имеет каналы подвода и слива масла, а на некоторых типах турбокомпрессоров имеются каналы для жидкостного охлаждения. Для исключения попадания масла из масляной полости в газозоудный тракт устанавливаются уплотнения. Со стороны турбины обычно применяется уплотнение с пружинным разжимным кольцом. Кольцо из специального чугуна или стали, устанавливается неподвижно в корпусе и скользит по канавке вала с очень малым торцевым зазором. Со стороны компрессора в основном применяется аналогичная конструкция.

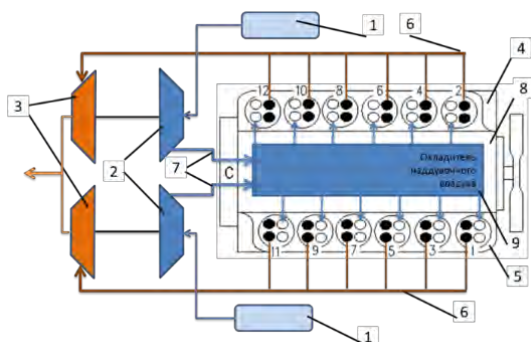


Рис.2. Система наддува двигателя фирмы Caterpillar модели 3516B:

1 – воздушный фильтр; 2 – компрессор; 3 – турбина; 4 – расположение четных цилиндров (левый борт); 5 – расположение нечетных цилиндров (правый борт); 6 – выход отработавших газов; 7 – наддувочный воздух; 8 – ресивер; 9 – охладитель наддувочного воздуха

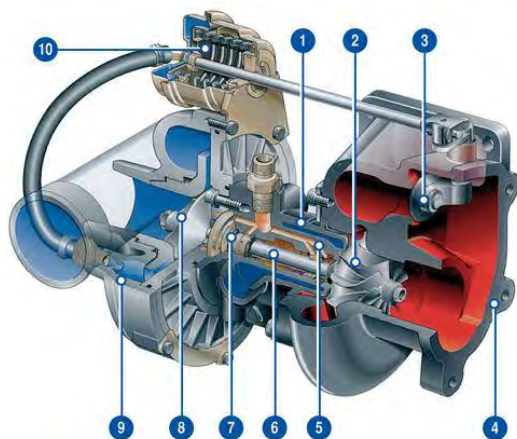


Рис.3. Устройство турбокомпрессора фирмы «Caterpillar»

1- корпус подшипников; 2- турбинное колесо; 3- перепускной клапан; 4- корпус турбины; 5- масляные каналы; 6- вал ротора; 7- подшипник скольжения; 8- компрессорное колесо; 9- корпус компрессора; 10- пневмопривод перепускного клапана

Методика экспериментального исследования

Настоящая методика включает основные подходы и условия проведения экспериментальных исследований рассматриваемых в научных трудах Гольдина А.С., Осташенкова В.Ф., Кузьмина Р.В., Попкова В.И., Камкина С. В., Возницкого И. В., Шмелева В. П., однако в настоящее время на судах применяются судовые главные высокооборотные электронно-управляемые четырехтактные двигатели с "V"-образным расположением цилиндров поршневой группы, с установленным блоком электронного управления, с заводскими системами диагностики и контроля в процессе эксплуатации.

Поскольку однотипные двигатели фирмы Caterpillar серии CAT 3500 имеют широкую область

применения не только в морской отрасли, но и в промышленности, то стендовые испытания носят информационный характер для морских двигателей.

Ходовые и швартовые приемо-сдаточные испытания современных главных ВОД^е проводятся сервисными инженерами фирмы изготовителя при помощи лицензированного комплекса, подключенного к блоку электронного управления двигателя. По окончании испытаний, автоматически, программой генерируется отчет по конечным теплофизическим параметрам и по контролю за превышением значений этих параметров выше допустимых норм, установленных заводом изготовителем. В машинный журнал экипажем заносятся только сведения значений некоторых теплофизических параметров, указанных на приборной панели двигателя на характерных режимах эксплуатации. Такой подход к определению технического состояния двигателя не дает возможность выполнить качественный и количественный анализ характеристик и сравнить со значениями приемо-сдаточных испытаний.

В связи с этим, в методику экспериментального исследования входит определение влияния количественных и качественных параметров на техническое состояние системы наддува современных ВОД в количестве 4 двигателей, наработкой в среднем 12000 часов. На всех исследуемых двигателях выполнены все необходимые регламентные работы в соответствии с рекомендациями завода изготовителя, прошли ежегодное освидетельствование инспектором Регистра и находятся в нормальном техническом состоянии.

Контроль теплофизических и вибрационных параметров дает возможность провести количественный анализ параметров на различных режимах эксплуатации, исследуемых двигателей, и косвенно диагностировать рабочее состояние деталей и подшипниковых узлов ТК (рисунок 4). На рисунке 4 представлены методы безразборной дефектации и технической диагностики с указанием диагностических признаков, косвенно характеризующих техническое состояние элементов системы наддува ВОД^е. Из рисунка 4 видно, что критериями количественной и качественной оценки технического состояния ТК являются теплофизические и вибрационные параметры и их значения [CAT, 1,2]:

- температура отработавших газов $t_{ог}$, °C;
- давление наддувочного воздуха p_n , кПа;
- температура охлаждающей жидкости воздухоохладителя $t_{овв}$, °C;
- среднеквадратичные значения С.К.З. (R.M.S) виброускорения $a_{с.к.з.}$ м/с², измеренные в широком диапазоне частот от 500 Гц до 12500 Гц в соответствии с требованиями.

Высокий диапазон частот измерения параметра вибрации ТК был выбран для того, чтобы убрать влияния двигателя работающего на низких частотах.



Рис. 4. Контроль пригодность диагностических параметров, косвенно характеризующих рабочее состояние деталей, элементов и систем высокооборотных двигателей

Инструментарий

При выполнении экспериментальных исследований были учтены основные погрешности результатов, такие как, систематические ошибки, случайные ошибки и грубые ошибки или промахи. Все измерительные приборы были поверены, и замеры постоянно производились лично авторами для снижения систематических ошибок при выполнении эксперимента. Для определения случайных ошибок применен метод математической статистики, основанный на теории вероятностей попадания случайной величины в доверительный интервал точности измерения. Правило «трех сигм» применялась для оперативного выявления грубых ошибок отклонения случайной величины от истинного значения на величину, большую 3 сигма, которое маловероятно.

Измерения теплофизических и вибрационных параметров исследуемых двигателей, проводились с помощью диагностического комплекса CAT ET и виброанализатора VIBXPRTII.

Испытания судов проводились при швартовном и ходовом режиме, при волнении моря не более 3 баллов, скорость ветра менее 5 м/с. Диапазон частоты вращения коленчатого вала двигателя выбран от 700 мин⁻¹ до 1500 мин⁻¹ с шагом 100 мин⁻¹ при увеличении и уменьшении нагрузки, температура охлаждающей жидкости зарубашечного пространства должна быть 60 °С и выше. Подключение и установка диагностического адаптера осуществляется согласно штатному расположению соединительных разъемов, снятие рабочих параметров необходимо проводить при работе двигателя на каждом режиме не менее 10-15 минут и установлении постоянных температур выпускных газов, охлаждающей жидкости и смазочного циркуляционного масла.

Для обработки экспериментальных данных были использованы математические модули, библиотеки мощного высокоуровневого языка программирования Пайтон (Python) с использованием библиотек pandas, numpy, SciPy,

matplotlib. Библиотека pandas позволяет обрабатывать большие данные, переданные от библиотеки numpy и далее обрабатывать их уже непосредственно в библиотеку SciPy, которая рассчитывает усредненную и регрессию с полиномом, находит доверительный интервал и выводит на графике при помощи библиотеки matplotlib [3-6].

Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование ВОД по контролю технического состояния включает:

1. Получение значений теплофизических и вибрационных параметров на различных режимах эксплуатации исследуемых двигателей (таблица 1).

2. Обработка полученных данных во время экспериментальных исследований (рисунок 3,4).

3. Результаты экспериментальных исследований.

Значения температуры охлаждающей жидкости воздухоохладителя $t_{онв}$ не изменялись в зависимости от нагрузки двигателя и составляли нормальное значение 40 °С, в связи с этим, не были включены в таблицу 1.

Из таблицы 1 видно, что выборка теплофизических и вибрационных параметров во время эксперимента составила:

– частота вращения двигателя n_d , мин⁻¹ и расход топлива V , л/ч составила 36 измерений;

– температура отработавших газов $t_{ог}$ и давление наддувочного воздуха p_n составила в два раза больше в связи с тем, что на одном из исследуемом двигателе находятся два ТК и коллектора отработавших газов с разных сторон левого и правого борта;

– среднеквадратичное значение ускорения $a_{с.к.з}$ было получено только на оборотах двигателя с выше 1000 мин⁻¹ в связи с тем, что частота вращения ТК составляет менее 500 Гц, что не входит в исследуемый диапазон частот оборотной и лопаточной частоты и их гармоник.

Таблица 1

Экспериментальные данные, полученные во время испытаний ВОД°серии САТ3516В морских буксиров с винторулевыми колонками, работающих на дизельном топливе

№	Параметры	Задаваемые значения для расчета	Примечание
1	x , (n , мин ⁻¹)	650, 810, 904, 1003, 1097, 1200, 1299, 1399, 1507	двигатель 1
		650, 806, 900, 1001, 1102, 1198, 1297, 1410, 1501	двигатель 2
		659, 809, 900, 1003, 1098, 1195, 1306, 1399, 1500	двигатель 3
		663, 806, 900, 998, 1100, 1198, 1305, 1409, 1499	двигатель 4
2	Y_1 , (p_n , кПа)	1, 2, 2, 6, 12, 17, 30, 42, 121 1, 1, 2, 6, 12, 19, 30, 40, 121	двигатель 1
		1, 1, 3, 6, 11, 19, 30, 41, 120 1, 1, 2, 5, 11, 20, 31, 42, 120	двигатель 2
		1, 1, 3, 6, 11, 23, 33, 40, 120 1, 1, 4, 6, 12, 21, 33, 42, 124	двигатель 3
		1, 2, 3, 8, 11, 19, 33, 42, 126 1, 1, 3, 6, 11, 19, 30, 41, 120	двигатель 4
3	Y_2 , ($t_{ог}$, °C)	175, 220, 250, 340, 380, 420, 436, 450, 488 174, 221, 247, 335, 390, 419, 448, 460, 494	двигатель 1
		182, 222, 262, 340, 384, 422, 450, 463, 490 179, 225, 242, 335, 388, 420, 440, 471, 488	двигатель 2
		172, 225, 248, 342, 386, 432, 440, 472, 491 173, 226, 254, 342, 384, 428, 455, 460, 482	двигатель 3
		179, 225, 253, 340, 385, 438, 447, 480, 496 179, 238, 260, 338, 380, 440, 449, 473, 482	двигатель 4
4	Y_3 , (B , л/ч)	27, 36, 47, 64, 80, 99, 140, 167, 213	двигатель 1
		27, 37, 48, 63, 81, 101, 142, 170, 220	двигатель 2
		26.9, 37.4, 48.6, 63.6, 81.4, 101, 142, 170, 220.4,	двигатель 3
		27, 36.3, 47.1, 64, 80, 99.2, 140, 167, 213	двигатель 4
5	Y_4 , ($a_{с.к.з}$)	1.1, 2.4, 4.7, 6.3, 9.8, 11 0.9, 2.7, 3.6, 6.7, 9.8, 12	двигатель 1
		1.2, 3.6, 5.4, 6.8, 9.6, 13 1.1, 2.6, 4.6, 8.2, 11.3, 13.9	двигатель 2
		1.2, 3.6, 7, 9.8, 11.2, 12.8 1.3, 2.9, 5.6, 9.7, 11.7, 13.5	двигатель 3
		1.3, 7.5, 11.6, 14, 15.6, 17.8 1.5, 5.6, 8.2, 9.6, 16, 17.5	двигатель 4

На рисунке 5 и в таблице 2 представлены результаты экспериментальных исследований количественной оценки технического состояния элементов системы наддува.

Из рисунка 5 видно что

– все экспериментальные данные не выходят за границы зоны доверительного интервала 3σ ;

– регрессионные зависимости параметров имеют различные полиномы степеней, например, давление наддувочного воздуха p_n имеет полином четвертой степени, а среднее квадратичное значение ускорения $a_{с.к.з}$ первой степени, носит линейный характер;

– не все зависимости параметров строятся от 650 мин⁻¹ и выше - это связано с тем, что в процессе математической обработки результатов оценку качества построенной модели даст коэффициент (индекс) детерминации r^2_{xy} , полученные аппроксимационные зависимости имеют значения корреляции r_{xy} ближе к 1, т.е. теснее статистическая связь.

Анализ показал, что все аппроксимационные зависимости имеют линейные и нелинейные зависимости, хорошо связывают значения, хорошо описывают экспериментальные данные, удовлетворяют различным критериям и имеют минимальный разброс, что проверено на крайние члены [7-12].

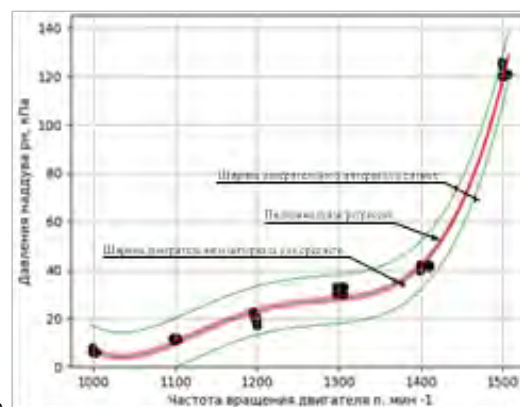
Проверена значимость уравнения регрессии и установлено, что математическая модель соответствует экспериментальным данным. Оценка значимости уравнения регрессии в целом проводилась на основе сравнения фактического F-критерия Фишера и его табличного значения.

Математическая модель количественной и качественной оценки влияния теплофизических параметров на техническое состояние элементов наддува исследуемых двигателей методом Лежандра и Гаусса имеет следующий вид:

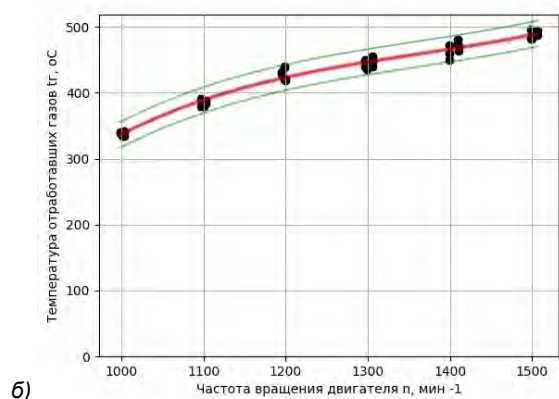
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 = f(n) \\ y_n \end{pmatrix} \pm \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_n \end{pmatrix}$$

где y_1 - температура отработавших газов $t_{ог}$, °C; y_2 - давление наддувочного воздуха p_n , кПа; y_3 - расход топлива B , л/ч; y_4 - виброускорение $a_{с.к.з}$, м/с²; ξ_1, ξ_2, ξ_3 - величины равные ширине доверительного интервала дисперсии 3σ "сигма".

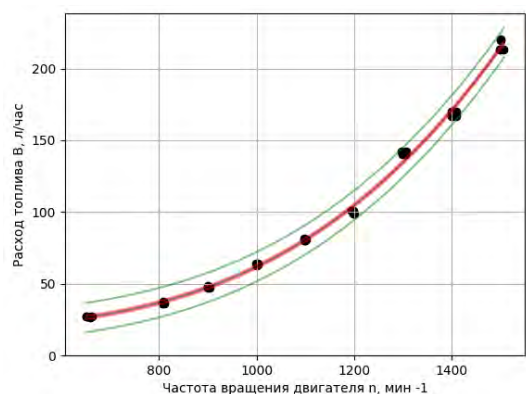
Математическая модель основывается на теплофизических параметрах, полученных с диагностических систем двигателей и дальнейшим статистическим анализом методом наименьших квадратов, нахождения полиномиальной зависимости, среднее квадратическое отклонения измерения значений величины, равной трем σ "сигма", с вероятностью 99,7% попадания в доверительный интервал параметров регрессии с учетом погрешности.



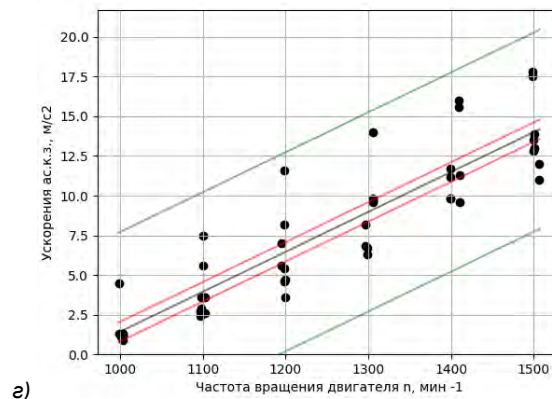
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Полиномиальные кривые зависимости параметров от частоты вращения двигателя

а) давления наддува p_n ; б) температура отработавших газов $t_{ог}$; в) расход топлива B ; г) виброускорения $a_{с.к.з.}$

Статистический анализ результатов измерений

Таблица 2

№	Уравнение регрессии теплотехнических параметров	Стандартное (среднеквадратичное) отклонение	Ширина доверительного интервала от	
			среднего	дисперсии
1	$Y_1 = 2e-08x^4 - 7,247e-05x^3 + 0,131x^2 - 103,16x + 30513$	3,36	1,9	10
2	$Y_2 = 1,127e-06x^3 - 0,00459x^2 + 6,444x - 2636,42$	6,48	3,8	19,44
3	$Y_3 = 1,2e-07x^3 - 0,00013x^2 + 0,067x + 3,767$	3,42	2,35	10,25
4	$Y_4 = 0,025x - 23,693$	2,09	1,23	6,27

Для апробации полученных данных математической модели с учетом опыта эксплуатации были включены, в качестве примера, значения температуры отработавших газов, при которых были зафиксированы дефекты, неисправности и аварии элементов системы наддува исследуемых двигателей (рисунок 6). Из рисунка 6 видно, что аварийные точки, указанные красным цветом, значения температуры отработавших газов на всем диапазоне изменения нагрузки, лежат за пределом ширины доверительного интервала 3σ "сигма". Авария ТК произошла на режиме, равном 1300 мин⁻¹, двигатель остановился при достижении температуры отработавших газов предельного значения, установленного заводом-изготовителем.

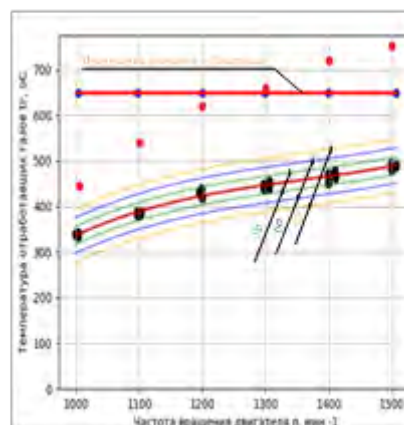


Рис. 6. Полиномиальная кривая зависимости температуры отработавших газов от частоты вращения двигателя

Заключение

Анализ количественной оценки технического состояния элементов системы наддува показал, что все параметры, косвенно влияющие на оценку технического состояния, имеют не большой разброс и входят в доверительный интервал 3σ "сигма". Выполненный качественный анализ выявил, что выбранные методы, параметры неразрушающего контроля позволяют косвенно характеризовать техническое состояние элементов системы наддува исследуемых двигателей. Статистический анализ полученных данных во время экспериментальных исследований за несколько лет наблюдений позволил получить уравнения регрессии теплофизических характеристик 3-х доверительных интервалов 9σ "сигма", исследуемых двигателей на различных режимах эксплуатации. Значения

параметров, полученных авторами ранее в условиях аварийной ситуации, выходят за границы интервала 9σ "сигма" при максимальных нагрузках, но не превышают предельно-допустимые значения завода-изготовителя при минимальных нагрузках двигателя.

В связи с этим, полученная методика позволяет контролировать параметры, косвенно влияющие на оценку технического состояния, элементов системы наддува исследуемых двигателей в широком диапазоне нагрузок.

Таким образом, полученные границы доверительных интервалов элементов системы наддува могут быть приняты в эксплуатации для оценки перехода из одного технического состояния в другое.

Литература

1. Caterpillar service information system. Monitoring and diagnostics system marine propulsion engine of the series CAT3500. SMCS - 1900; 7400; 7450; 7451, 2023.
2. ГОСТ ISO 2954-2014 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений. М.: Стандартиформ, 2019.
3. Чубинский А.Н. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов / А.Н. Чубинский, Д.С. Русаков, И.М. Батырева, Г.С. Варанкина. – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – 109 с.
4. Самохина С.С. Физика. Обработка результатов физического эксперимента : учеб. метод. пособие / сост. С. С. Самохина. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2015. – 103 с.
5. Шашков В.Б. Обработка экспериментальных данных и построение эмпирических формул. Курс лекций. : Учебное пособие.- Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2005. – 150 с.
6. Спиринов Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин; Под общ. ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. — 290 с.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 2006. — 479 с.
8. Бородин А.Н. Элементарный курс теории вероятностей и математической статистики: Учеб. для вузов. 3-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2002. — 356 с.
9. Вуколов Э. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов Statistica и Excel. — М: Форум, 2010. — 464 с.
10. Халафян А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA. — М: Либроком, 2013. — 384 с.
11. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. Учебное пособие. — М: Юрайт, 2015. — 496 с.
12. Ефимова А.И., Зотеев А.В., Сляккин А.А. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: Учебно-методическое пособие. — М.: МГУ, Физический факультет, 2012. — 39 с.
13. Епихин А.И., Игнатенко А.В., Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В. Основные тренды внедрения технологий искусственного интеллекта в управлении морскими автономными надводными судами. Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 1 (98). С. 88-96.
14. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Трапезникова Д.А. Методы оптимизации алгоритмов управления судовыми электроэнергетическими системами с целью повышения качества оптимизации. Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 2 (103). С. 76-79.

References

1. Caterpillar service information system. Monitoring and diagnostics system marine propulsion engine of the series CAT3500. SMCS - 1900; 7400; 7450; 7451, 2023.
2. GOST ISO 2954-2014 Vibracija. Kontrol' sostojanija mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashhajushhihsja chastjah. Trebovanija k sredstvam izmerenij [Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Requirements for measuring instruments]. М.: Standartinform, 2019.
3. Chubinskij A.N. Metody i sredstva nauchnyh issledovanij. Metody planirovanija i obrabotki rezul'tatov jeksperimentov [Methods and means of scientific research. Methods of planning and processing of experimental results] / A.N. Chubinskij, D.S. Rusakov, I.M. Batyрева, G.S. Varankina. – SPb.: SPbGLTU, 2018. – 109 s.
4. Samohina S.S. Fizika. Obrabotka rezul'tatov fizicheskogo jeksperimenta [Processing of the results of a physical experiment] : ucheb. metod. posobie / sost. S. S. Samohina. – Ul'janovsk : UVAU GA(I), 2015. – 103 s.

5. Shashkov V.B. Obrabotka jeksperimental'nyh dannyh i postroenie jempiricheskikh formul. Kurs lekcij [Processing of experimental data and construction of empirical formulas]. : Uchebnoe posobie.- Orenburg: GOU VPO OGU, 2005. — 150 s.
6. Spirin N.A. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo jeksperimenta: Uchebnoe posobie [Methods of planning and processing the results of an engineering experiment] / N.A. Spirin, V.V. Lav-rov, L.A. Zajnullin, A.R. Bondin, A.A. Burykin; Pod obshh. red. N.A. Spirina. — Ekaterinburg: OOO «UINC», 2015. — 290 s.
7. Gmurman V.E. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika [Probability theory and mathematical statistics]: Ucheb. posobie dlja vuzov. — M.: Vysshaja shkola, 2006. — 479 s.
8. Borodin A.N. Jelementarnyj kurs teorii verojatnostej i matema- ticheskoj statistiki [Elementary course in probability theory and mathematical statistics]: Ucheb. dlja vuzov. 3-e izd., ispr. i dop. — SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2002. — 356 s.
9. Vukolov Je. Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniju operacij s ispol'zovaniem paketov Statistica i Excel [Fundamentals of statistical analysis. Workshop on statistical methods and operations research using Statistica and Excel packages]. — M: Forum, 2010. — 464 s.
10. Halafjan A. Promyshlennaja statistika. Kontrol' kachestva, analiz processov, planirovanie jeksperimentov v pakete STATISTICA [Industrial statistics. Quality control, process analysis, experiment planning in the STATISTICA package]. — M: Librokom, 2013. — 384 s.
11. Sidnjaev N. I. Teorija planirovaniya jeksperimenta i analiz statisticheskikh dannyh [Theory of experiment planning and statistical data analysis]. Uchebnoe posobie. — M: Jurajt, 2015. — 496 s.
12. Efimova A.I., Zoteev A.V., Skljankin A.A. Obshhij fizicheskij praktikum fizicheskogo fakul'teta MGU. Pogreshnosti jeksperimenta [General Physics workshop of the MSU Faculty of Physics. Experimental errors]: Uchebno-metodicheskoe posobie. — M.: MGU, Fizicheskij fakul'tet, 2012. — 39 s.
13. Epihin A.I., Ignatenko A.V., Studenikin D.E., Hekert E.V. Osnovnye trendy vnedrenija tehnologij iskusstvennogo intellekta v upravlenii morskimi avtonomnymi nadvodnymi sudami [The main trends in the introduction of artificial intelligence technologies in the management of marine autonomous surface vessels]. Jekspluatacija morskogo transporta. 2021. № 1 (98). S. 88-96.
14. Karakaev A.B., Hekert E.V., Trapeznikova D.A. Metody optimizacii algoritmov upravlenija sudovymi jelektroenergeticheskimi sistemami s cel'ju povyshenija kachestva optimizacii [Methods of optimization of algorithms for controlling ship electric power systems in order to improve the quality of optimization]. Jekspluatacija morskogo transporta. 2022. № 2 (103). S. 76-79.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герасиди Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353923, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Лисаченко Алексей Витальевич, аспирант кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 353918, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Alexey V. Lisahenko, graduate student of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.05.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 03.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.10.2023

Научная статья

УДК 539.1.08; 621.892.84

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.009>**Исследование деградации судовых моторных масел методом инфракрасной Фурье спектроскопии**Синявский Н.Я.¹ nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, Булычев А.Г.¹ aleksandr.bulychev@klgtu.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Целью работы явилось исследование процессов деградации углеводородов судовых моторных масел и истощения противоизносной присадки диалкилдитиофосфата цинка с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Исследование является одним из предварительных анализов данным методом нескольких свежих и отработанных судовых моторных масел, которые ранее не исследовались на старение в процессе работы двигателя. Были проанализированы изменения состава отработанных масел по сравнению со свежими маслами. Измерены интенсивности поглощения примесей разных веществ в ИК-спектрах исследованных моторных масел. Подтверждена возможность идентификации масла по наличию линий абсорбции присадок. Полученные данные являются ценным источником информации о процессах окисления, нитрования и сульфатизации углеводородов масел, об истощении улучшающих присадок, содержащихся в масле. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы в дальнейшем для построения экспертной системы определения параметров неизвестных масел.

Ключевые слова: судовые моторные масла, деградация углеводородов, истощение присадок, ИК-Фурье спектроскопия

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания Федерального агентства по рыболовству, рег. № 122030900056-4

Для цитирования: Синявский Н.Я., Булычев А.Г. Исследование деградации судовых моторных масел методом ИК-Фурье спектроскопии, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 72—78. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.009

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.009>**Study of degradation of marine engine oils using Fourier transform infrared spectroscopy**Nikolai Ja. Sinyavsky¹ nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, Alexander G. Bulychev¹ aleksandr.bulychev@klgtu.ru¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The purpose of the work was to study the processes of degradation of hydrocarbons in marine motor oils and depletion of the anti-wear additive zinc dialkyldithiophosphate using Fourier transform infrared spectroscopy. The study is one of the preliminary analyzes by this method of several fresh and used marine engine oils, which have not previously been studied for aging during engine operation. Changes in the composition of used oils compared to fresh oils were analyzed. The absorption intensities of impurities of various substances in the IR spectra of the studied motor oils were measured. The possibility of identifying oil by the presence of additive absorption lines has been confirmed. The data obtained are a valuable source of information on the processes of oxidation, nitration and sulfatization of hydrocarbons of the engine oils, and on the depletion of improving additives contained in the oil. The results obtained in the work can be used in the future to build an expert system for determining the parameters of unknown engine oils.

Keywords: marine engine oils, hydrocarbon degradation, additive depletion, FT-IR spectroscopy

Financial Support: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Fisheries Agency, reg. No. 122030900056-4

For citation: Nikolai Ja. Sinyavsky, Alexander G. Bulychev, Study of degradation of marine engine oils using Fourier transform infrared spectroscopy. 2023. № 4 part 1, P. 72—78. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.009

Введение

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье является универсальным инструментом, используемым для обнаружения распространенных загрязнителей, побочных продуктов разложения смазочных материалов и добавок в смазочных маслах. Она стала широко используемым методом для быстрой оценки различных характеристик смазочных материалов [1]. В литературе имеется множество публикаций с исследованиями моторных масел данным методом. ФП-ИК анализ дает богатую информацию о пробе моторного масла, о составе как

по углеводородной основе, по продуктам деградации углеводородов, так и по присадкам, улучшающим качество масла. Преимущества метода ФП-ИК в небольшом количестве образца и в относительно простом способе анализа. Однако инфракрасные спектры всех марок масел обычно более или менее похожи друг на друга. Целью исследований, описанных в статье [2], явилось применение корреляционного метода для различения инфракрасных спектров, соответствующих химическому составу образцов одного и того же масла различной степени использования, для криминалистических целей. Обнаружению

контрафактного моторного масла в криминалистическом аспекте с помощью ФП-ИК анализа посвящена работа [3]. Идентификация производилась по присадкам к моторному маслу, таким как ZDDP (диалкилдифосфат цинка) при 978 см^{-1} , 654 см^{-1} и полиизобутилен сукцинамида при 1704 см^{-1} .

Анализ моторных масел показывает идентичность основных углеводородов в их структурах. Целью работы [4] явилась идентификация эксплуатационных автомобильных жидкостей методом ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах моторных масел были зафиксированы полосы поглощения в области 750 см^{-1} , что соответствует C-S-валентным связям. Полоса 1400 см^{-1} соответствует СН связям алифатического характера, связи бензольного кольца дают полосу 1500 см^{-1} , концевые CH_3 - связи выражены полосой 2900 см^{-1} , ароматические СН – связи имеют в спектре полосу при 3000 см^{-1} . Спектры всех моторных масел очень похожи друг на друга, поэтому идентифицировать конкретное масло с помощью ИК – спектра довольно сложно. Спектры использованных моторных масел мало чем отличаются от спектров свежих моторных масел. При этом полоса поглощения, соответствующая валентным C-S- связям на спектре использованного масла при 750 см^{-1} , имеет интенсивность существенно выше, чем на спектрах свежих моторных масел. Этот признак позволяет различать данные масла.

В статье [5] показана возможность ИК – Фурье спектроскопии определять наличие присадок в моторных маслах. Установлены характерные линии поглощения для некоторых моюще-диспергирующих, депрессорных и антиокислительных присадок. На примере моющей, диспергирующей, антиокислительной и нейтрализующей присадки Детерсол-140 показана возможность обнаружения присадок в моторном масле. В этой публикации приводятся линии поглощения для наиболее часто применяемых в моторных маслах присадок: антиокислительная присадка ДФ-1 – 1006 см^{-1} ; депрессорная присадка для понижения температуры застывания, повышения вязкости ПМА «Д» – 1731 см^{-1} ; моюще-диспергирующая присадка Детерсол-140 – 1504 см^{-1} , алкилфенольная присадка с увеличенным запасом щелочности ВНИИ НП-714 – 1305 см^{-1} , моюще-диспергирующая присадка КНД – 1064 см^{-1} .

В обзоре [6] приведен анализ публикаций по применению ИК-спектрометрии при анализе нефти и нефтепродуктов. В статье [7] приводятся данные ИК-спектроскопии отработанных моторных масел, позволяющие определять его работоспособность и остаточный ресурс. Приведены волновые числа воды, сажи, антифриза, топлива, карбонильного окисления, нитрования и сульфатирования, деградации присадок различного назначения, а также содержания ароматических углеводородов.

В работе [8] с привлечением инфракрасной спектроскопии рассмотрен метод создания нового биокompозитного материала на основе древесины и описан механизм взаимодействия отработанного моторного масла с древесиной. При этом ИК - спектр отработанного моторного масла в древесине отличается появлением трех новых пиков.

В работе [9] исследовался элементный состав продуктов износа и улучшающих присадок в

отработанных моторных маслах судовых двигателей. Проанализированы изменения элементного состава отработанных масел по сравнению со свежими маслами. Описаны предполагаемые причины изменения элементного состава при использовании моторных масел. Подтверждена возможность идентификации масла по составу элементов-присадок (Ca, P, Zn и др.). Элементный состав является ценным источником информации о наличии продуктов износа в отработанных моторных маслах и связи их содержания с износом деталей и возможными неисправностями двигателя.

В [10] впервые показана возможность использования распределения времен диэлектрической релаксации для идентификации масел, регистрации изменений в отработанных моторных маслах и корреляции времен релаксации с другими характеристиками, в частности, с содержанием присадок и продуктов износа. Полученные результаты могут быть полезны при разработке средств экспресс-диагностики двигателя.

В [11] исследовались образцы смазочных материалов представляющих собой минеральные и синтетические масла. Цель работы состояла в том, чтобы увидеть, есть ли сдвиг в ИК - спектре функциональных групп и интенсивности поглощения масла. При анализе изменений при деградации смазочного материала в ИК – спектре обнаружено, что смазочные материалы претерпевают: окисление (1700 см^{-1}), нитрование (1630 см^{-1}), появление сажи (2000 см^{-1}), сульфатацию (1150 см^{-1}) и обводнение (3400 см^{-1}).

В работе [12] исследуются свойства отработанных моторных масел с использованием четырех различных кислот. Было изучено влияние этих обработок на свойства обработанного отработанного масла. ИК-Фурье-анализ был использован для определения TAN (общее кислотное число) и TBN (общее щелочное число) значений отработанных масел. Определены линии абсорбции исследованных образцов.

Известно, что сажа вызывает повышенный износ компонентов двигателя. Хотя было предложено несколько механизмов износа, точные механизмы износа, вызванного сажой, до сих пор полностью не изучены. Исследование [13] направлено на изучение механизма адсорбции противоизносной присадки на частицах сажи. Масло с частицами сажи и противоизносной присадкой диалкилдифосфата цинка (ZDDP) были исследованы в данной работе методом ИК - спектроскопии. Результаты исследования показали, что как цинк, так и фосфор, являющиеся химическими элементами противоизносной присадки ZDDP, адсорбируются на частицах сажи. Этот механизм адсорбции присадок может приводить к повышенному износу компонентов двигателя из-за отсутствия присадок в масле.

В [14] для обработки данных ИК-Фурье спектроскопии использованы методы хемометрики. Предложенный подход позволяет строить статистические модели на основе данных ИК-спектроскопии, фильтрует неинформативные переменные, позволяет достигать высокой прогностической эффективности.

В [15] инфракрасная спектрометрия с преобразованием Фурье в сочетании с методом

наименьших квадратов и регрессией главных компонентов (PCR) была предложена и протестирована в качестве альтернативы стандартному методу определения кинематической вязкости с помощью капиллярного вискозиметра. Предлагаемый метод быстрее и требует меньшего количества пробы масла.

Как показывает анализ литературы, интенсивность линий ИК- спектров продуктов разложения углеводов отработанных моторных масел является очень низкой, как и спектральных линий присадок. Это существенно затрудняет применение метода, приводимые в литературе данные зачастую являются противоречивыми.

Целью настоящей работы является один из предварительных анализов методом ИК-Фурье спектроскопии нескольких свежих и отработанных судовых моторных масел, которые ранее не исследовались на деградацию в процессе работы двигателя. Исследование изменений в составе отработанных масел по сравнению со свежими маслами. Установление возможности идентификации масла по наличию линий абсорбции присадок, улучшающих его характеристики.

Методика экспериментальных исследований

Регистрация инфракрасных спектров образцов проводилась на ИК-Фурье-спектрометре ФТ-801 (производитель прибора научно-производственная фирма "СИМЕКС", г. Новосибирск) [16]. Возможности прибора продемонстрированы в статье [17]. Для снятия спектров применяли метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с использованием универсальной приставки НПВО. Образцы нанесли непосредственно на кристалл приставки с помощью стеклянного шпателя. В качестве образцов были выбраны свежие и отработанные моторные масла: Mobil 5W30, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Shell Rimula 15W40, Total Disola M4015 и Lukoil TPEO 12/40.

Спектры регистрировались при комнатной температуре. Диапазон сканирования составлял от 500 см^{-1} до 4000 см^{-1} при разрешении 8 см^{-1} , число сканирования 36. Опорный спектр фоновой воздуха снимался перед каждым сканированием образца. Спектры обработаны в программе ZaiR 3.5. Для коррекции нулевой линии спектров использовалась программа OriginPro 9.1.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Согласно выполненным измерениям, ИК - спектры всех масел характеризуется наличием сильного двугорбого пика поглощения при волновом числе 2921 см^{-1} , что соответствует валентным колебаниям группы СН алканов, и при 2851 см^{-1} – колебаниям СН-групп метиловых эфиров. Полосы поглощения при 1462 см^{-1} и 1377 см^{-1} соответствуют колебаниям метильной группы, тогда как содержание метиленовых групп CH_2 определяется по полосе 721 см^{-1} . Эти спектры совпадают с многочисленными литературными данными, например, в работе [8].

На рис. 1 приведены ИК-Фурье спектры свежих моторных масел по сравнению с базовым моторным маслом SN-150. Это позволяет определить линии спектра, относящиеся к присадкам в маслах. Рис. 2 иллюстрирует ИК- спектры шести отработанных моторных масел в сравнении со свежими маслами. Сравнение этих спектров позволяет обнаружить линии, относящиеся к продуктам деградации масел при работе двигателя. В таблицу 1 сведены интенсивности сигналов ИК-Фурье спектров, измеренные на характерных значениях волновых чисел, соответствующих некоторым присадкам, продуктам разложения и загрязнения масел.

Основная противоизносная присадка диалкилдитиофосфат цинка (ZDDP) в наибольшем количестве присутствует в свежих маслах Mobil 5W40 и Rimula 15W40. Наименьшее ее содержание в маслах Total M4015 и TPEO 12/40. Это же видно, и по элементному составу [9]: фосфора и цинка меньше всего именно в этих маслах. Судя по таблице 1, во всех свежих маслах, кроме Total M4015 и TPEO 12/40, присутствует диспергирующая присадка полиизобутилена сукцинимида (ПБС). Модификатор вязкости полиметакрилатная присадка марки "Д" (МПА «Д»), по-видимому, содержится в масле Mobil 5W30. Антиокислительная присадка ДФ-1, судя по таблице 1, в исследованных маслах отсутствует. Судя по элементному составу [9], в маслах Total M4015 и TPEO 12/40 наибольшее содержание кальция, это свидетельствует о наличии в них моющей присадки алкилсалицилата кальция.

Для того, чтобы обнаружить изменения в ИК-спектре отработанного масла по сравнению со свежим маслом, удобно использовать разностный спектр. Пример разностного спектра для моторного масла Mobil 5W40, с указанием характерных значений волновых чисел, приведен на рис. 3.

В отработанных маслах (рис. 2) интенсивность линии противоизносной присадки диалкилдитиофосфата цинка уменьшается по сравнению со свежими маслами, что связано с истощением, износом присадки. Содержание воды в отработанном масле может быть измерено методом инфракрасной спектроскопией или другими методами. Вода в смазочном масле является загрязняющим веществом и потенциально опасна для двигателя даже в небольшом количестве. Обычно принято избегать содержания воды более 0,2%. Полоса поглощения в ИК - спектре воды в отработанном масле при $k = 3400\text{ см}^{-1}$. По данным таблицы 1 загрязняющей примеси воды в исследованных отработанных моторных маслах не обнаруживается.

Продукты окисления в масле имеют поглощение при 1710 см^{-1} [18]. Окисление – это процесс, при котором кислород взаимодействует с молекулами углеводов с образованием нерастворимых углеродистых остатков и смол. На окисление масла влияют температура и загрязнение. Чем выше степень окисления, тем хуже масло и тем хуже его смазывающие свойства.

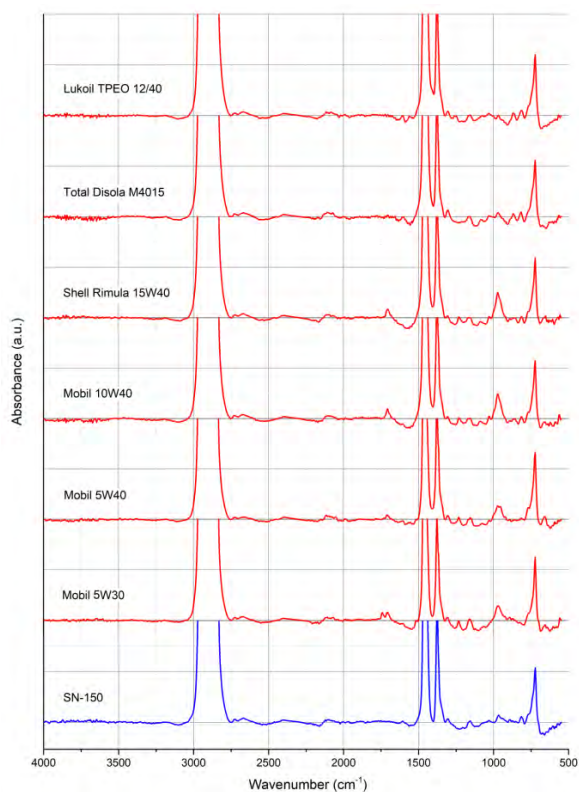


Рис. 1. Спектры свежих моторных масел по сравнению со спектром базового масла SN-150

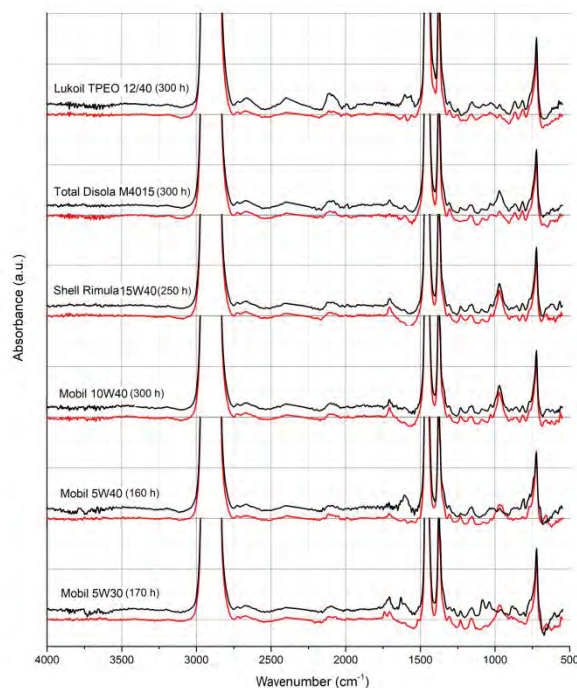


Рис. 2. Изменения в спектрах отработанных масел (черный цвет) по сравнению со свежими маслами (красный цвет)

Таблица 1
Интенсивности поглощения разных веществ в ИК-спектрах исследованных моторных масел

Вещество	Волн. число ν , cm^{-1}	Абсорбция, отн. ед.										
		NS-150	Mobil 5W30		Mobil 10W40		Rimula 15W40		Total M4015		TPEO 12/40	
			0 час.	170 час.	0 час.	300 час.	0 час.	250 час.	0 час.	300 час.	0 час.	300 час.
ZDDP	968	0.015	0.022	0.007	0.032	0.029	0.032	0.030	0.012	0.022	0.008	0.008
ПБС	1709	0.009	0.016	0.020	0.017	0.015	0.016	0.014	0.009	0.013	0.008	0.009
МПА «Д»	1731	0.009	0.013	0.014	0.009	0.008	0.009	0.009	0.010	0.009	0.008	0.008
ДФ-1	1006	0.008	0.008	0.018	0.010	0.010	0.010	0.010	0.008	0.009	0.008	0.008
Вода	3400	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009
Сажа	2000	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.009	0.008
Оксиданты	1740	0.008	0.015	0.013	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.008	0.009
Нитраты	1630	0.007	0.005	0.020	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.004	0.008
Сульфаты	1150	0.008	0.007	0.008	0.007	0.002	0.002	0.002	0.000	0.001	0.007	0.010
Гликоль	1040	0.008	0.002	0.015	0.005	0.004	0.004	0.004	0.006	0.006	0.008	0.008
Дизтопливо	800	0.010	0.004	0.003	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.010	0.06

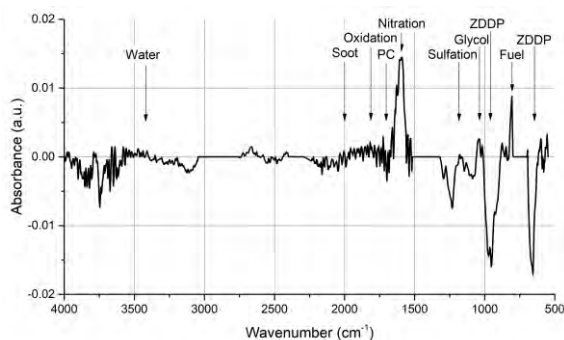


Рис. 3. Разностный спектр Mobil 5W40 (отработанное 160 час. – свежее масло).

Наличия оксидантов в отработанных маслах не регистрируется.

На нитрование влияет деградация масла и результат реакции масла с NO_x . Для измерения азотирования используется поглощение на значении волнового числа 1620 cm^{-1} . Высокий уровень нитрования может привести к истощению присадок, повышению вязкости и образованию отложений. Нитратов в использованных моторных маслах больше всего в масле Mobil 5W30 (4 раза больше, чем в свежем масле), а также в маслах Mobil 5W40 и TPEO 12/40 (в 1.5-2 раза больше, чем в свежем масле). В остальных отработанных маслах нитраты не обнаруживаются.

Сульфатацию измеряют при волновом числе инфракрасного излучения 1150 cm^{-1} . Побочные сульфатные продукты обычно образуются в результате окисления сернистых компонентов присадок или загрязнения топлива и являются результатом реакции масла с SO_2 - группой. Сульфатация увеличивает образование лаков и шлама, которые ухудшают характеристики смазочного материала. Незначительное увеличение содержания сульфатов регистрируется только в отработанном масле TPEO 12/40.

Количество сажи измеряется по поглощению инфракрасного излучения при $k=2000 \text{ cm}^{-1}$. На содержание сажи влияет плохое сгорание

(неправильный впрыск), нехватка воздуха (из-за забитого воздушного фильтра, неисправного наддува), перегрузка, плохое техническое обслуживание и т. д. Сажа в исследованных отработанных маслах, безусловно, есть, о чем свидетельствует их цвет. Однако, в ИК – спектрах линии поглощения не наблюдается, очевидно, из-за малой интенсивности.

Загрязнение масла топливом, попадающим через утечки топлива или в виде несгоревшего топлива через камеру сгорания. Дизельное топливо обнаруживается в масле линией ИК – спектра при $k=800 \text{ cm}^{-1}$. Небольшое загрязнение дизельным топливом наблюдается только для отработанного масла Mobil 5W40.

Быстрая деградация моторного масла происходит при попадании в него гликоля из жидкости системы охлаждения двигателя. Антифриз, содержащий гликоль, попадает в масло из-за плохих уплотнителей. Гликоль обнаруживается в ИК – спектрах при $k=1040 \text{ cm}^{-1}$ для отработанного масла Mobil 5W30.

Заключение

Эта работа является одним из предварительных анализов методом ИК-Фурье спектроскопии нескольких свежих и отработанных судовых моторных масел, которые ранее не исследовались на деградацию в процессе работы двигателя. Были проанализированы изменения состава отработанных масел по сравнению со свежими маслами. Подтверждена возможность идентификации масла по наличию линий абсорбции присадок. Проведенные исследования показали, что состав изучаемых свежих и отработанных моторных масел определяется многими факторами. Данные, полученные в работе, могут быть использованы в дальнейшем для построения экспертной системы определения параметров неизвестных масел. Они являются ценным источником информации о процессах окисления, нитрования и сульфатизации углеводородов масел, об источниках улучшающих присадок, содержащихся в масле.

Литература

1. Jeremy Wright, Benefits of FTIR Oil Analysis. [Electronic resource]. URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/30205/ftir-oil-analysis> (Date of access: 10.25.2023).
2. Zieba-Palus J., Koscielniak P., Łacki M. Differentiation between used motor oils on the basis of their IR spectra with application of the correlation method. Forensic Science International, 2001, vol. 122, pp. 35–42.
3. Joshi D.C., Chutke N.L. Infrared spectroscopy technique for differentiation of genuine and counterfeit engine oil – a forensic aspect. MOJ Civil Eng., 2017, vol. 3, no. 3, pp. 314–316.
4. Выхованец Е.П., Мосталыгина Л.В., Русаков Ю.С. Исследование эксплуатационных жидкостей автомобиля методом ИК-спектроскопии // Вестник КГУ. Серия «Технические науки». 2013. Т. 8. № 2. С. 65–67.
5. Марталов А.С. Определение кондиционности низкотемпературных свойств минерального моторного масла с помощью ИК-спектроскопии // Нефтепереработка и нефтехимия. 2007. № 2. С. 23–25.
6. Иванова Л.В., Сафиева Р.З., Кошелев В.Н. ИК-спектрометрия в анализе нефти и нефтепродуктов // Вестник Башкирского университета. Раздел «Химия». 2008. Т. 13. № 4. С. 869–874.
7. Хазиев А.А., Лаушкин А.В., Постолит А.В., Васильева Л.С., Борисов Б.С. Экспресс-анализ моторных масел на основе инфракрасной спектроскопии с разложением в ряд Фурье // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 2. С. 116–125.
8. Belchinskaya L. et al. Studying and imparting moisture absorption qualities of the new wood based bio-composite material. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020, pp. 595.
9. Sinyavsky N., Kostrikova N. Analysis of the marine engine oils elemental constituents for engine diagnostics. Jurnal Tribologi, 2023, vol. 39 (in print).
10. Sinyavsky N., Synashenko O., Kostrikova N. Application of relaxation times distribution of dielectric permittivity for marine motor oils analysis. Journal of ETA Maritime Sci., 2023, vol. 11, no. 3, pp. 209–216.

11. Patty D.J., Lokollo R.R. FTIR Spectrum Interpretation of Lubricants with Treatment of Variation Mileage. *Advances in Physics Theories and Applications*, 2016, vol. 52, pp. 13-20.
12. Abu-Elella, R & Ossman, Mona & Farouq, Rania & Abdel Fatah, M. Used Motor Oil Treatment: Turning Waste Oil Into Valuable Products. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 2015, vol. 7, pp. 57-67.
13. Motamen S.F., Morina A. & Neville A. Zinc Dialkyldithiophosphate Additive Adsorption on Carbon Black Particles. *Tribol Lett.*, 2018, vol. 66, pp.118.
14. Pfeiffer P., Ronai B., Vorlaufer G., Dörr N., Filzmoser P. Weighted LASSO variable selection for the analysis of FTIR spectra applied to the prediction of engine oil degradation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2022, vol. 228, pp. 104617.
15. Sejkorová M., Kučera M., Hurtová I., Voltr O. Application of FTIR-ATR Spectrometry in Conjunction with Multivariate Regression Methods for Viscosity Prediction of Worn-Out Motor Oils. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, pp. 3842.
16. ИК фурье-спектрометр ФТ-801, [Электронный ресурс]. URL: http://simex-ftir.ru/FT-801_FTIR_Spectrometer.pdf (Дата обращения 25.10.2023).
17. Карстен О.И., Ежовская Т.Б., Сысоева С.С., Буренко Н.Д., Смазки и масла для предприятий РЖД. Исследование на ИК-Фурье-спектрометре "СИМЕКС" ФТ-801 // *Лаборатория и производство*. 2018. № 1, С. 96-101.
18. Used engine oil analysis. User interpretation guide, CIMAC. 2011. vol. 30. [Electronic resource]. URL: https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_30.pdf (Date of access: 10.25.2023).

References

1. Jeremy Wright, Benefits of FTIR Oil Analysis. [Electronic resource]. URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/30205/ftir-oil-analysis> (Date of access: 10.25.2023).
2. Zieba-Palus J., Koscielniak P., Łacki M. Differentiation between used motor oils on the basis of their IR spectra with application of the correlation method. *Forensic Science International*, 2001, vol. 122, pp. 35–42.
3. Joshi D.C., Chutke N.L. Infrared spectroscopy technique for differentiation of genuine and counterfeit engine oil – a forensic aspect. *MOJ Civil Eng.*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 314-316.
4. Vykhovanets E.P., Mostalygina L.V., Rusakov Yu.S. Issledovaniye ekspluatatsionnykh zhidkostey avtomobilya metodom IK-spektroskopii [Study of vehicle operating fluids using IR spectroscopy]. *Vestnik KGU. Seriya «Tekhnicheskiye nauki» [Bulletin of KSU, Series "Technical Sciences"]*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 65-67.
5. Martalov A.S. Opredeleniye konditsionnosti nizkotemperaturnykh svoystv mineral'nogo motornogo masla s pomoshch'yu IK-spektroskopii [Determination of the low-temperature properties of mineral motor oil using infrared spectroscopy]. *Neftepererabotka i neftekhimiya [Oil refining and petrochemistry]*, 2007, no. 2, pp. 23–25.
6. Ivanova L.V., Safieva R.Z., Koshelev V.N. IK-spektrometriya v analize nefti i nefteproduktov [IR spectrometry in the analysis of oil and petroleum products]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta. Razdel «Khimiya» [Bulletin of the Bashkir University, section "Chemistry"]*, 2008, vol. 13, no. 4, pp. 869-874.
7. Khaziev A.A., Laushkin A.V., Postolit A.V., Vasilyeva L.S., Borisov B.S. Ekspress-analiz motornykh masel na osnove infrakrasnoy spektroskopii s razlozheniyem v ryad Fur'ye [Express analysis of motor oils based on infrared spectroscopy with Fourier series expansion]. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport facilities. Ecology]*, 2017, no. 2, pp. 116-125.
8. Belchinskaya L. et al. Studying and imparting moisture absorption qualities of the new wood based bio-composite material. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, pp. 595.
9. Sinyavsky N., Kostrikova N. Analysis of the marine engine oils elemental constituents for engine diagnostics. *Jurnal Tribologi*, 2023, vol. 39 (in print).
10. Sinyavsky N., Synashenko O., Kostrikova N. Application of relaxation times distribution of dielectric permittivity for marine motor oils analysis. *Journal of ETA Maritime Sci.*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 209-216.
11. Patty D.J., Lokollo R.R. FTIR Spectrum Interpretation of Lubricants with Treatment of Variation Mileage. *Advances in Physics Theories and Applications*, 2016, vol. 52, pp. 13-20.
12. Abu-Elella, R & Ossman, Mona & Farouq, Rania & Abdel Fatah, M. Used Motor Oil Treatment: Turning Waste Oil Into Valuable Products. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 2015, vol. 7, pp. 57-67.
13. Motamen S.F., Morina A. & Neville A. Zinc Dialkyldithiophosphate Additive Adsorption on Carbon Black Particles. *Tribol Lett.*, 2018, vol. 66, pp.118.
14. Pfeiffer P., Ronai B., Vorlaufer G., Dörr N., Filzmoser P. Weighted LASSO variable selection for the analysis of FTIR spectra applied to the prediction of engine oil degradation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2022, vol. 228, pp. 104617.
15. Sejkorová M., Kučera M., Hurtová I., Voltr O. Application of FTIR-ATR Spectrometry in Conjunction with Multivariate Regression Methods for Viscosity Prediction of Worn-Out Motor Oils. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, pp. 3842.
16. IR Fourier spectrometer FT-801, [Electronic resource]. URL: http://simex-ftir.ru/FT-801_FTIR_Spectrometer.pdf (Date of access: 10.25.2023).
17. Karsten O.I., Ezhevskaya T.B., Sysoeva S.S., Burenko N.D. Смазки и масла для предприятий РЖД. Исследование на ИК-Фурье-спектрометре "СИМЕКС" ФТ-801 [Lubricants and oils for Russian Railways enterprises. Research on the IR-Fourier spectrometer "SIMEKS" FT-801]. *Лаборатория и производство [Laboratory and production]*, 2018, no. 1, pp. 96-101.
18. Used engine oil analysis. User interpretation guide, CIMAC. 2011. vol. 30. [Electronic resource]. URL: https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_30.pdf (Date of access: 10.25.2023).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Синявский Николай Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Nikolai Ja. Sinyavsky, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Head of the Department of physics, Kaliningrad state technical University, Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Булывчев Александр Григорьевич, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: aleksandr.bulychev@klgtu.ru

Alexander G. Bulychev, Ph. D. (Chem), assistant professor, Kaliningrad state marine technical University, Sovetsky Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: aleksandr.bulychev@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.10.2023.

Научная статья

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.010>**Формирование структуры интеллектуальной системы автоматического управления судовым двигателем**Епихин А.И.¹ bsmbeton@mail.ru, Хекерт Е.В.¹ zur_mga@nsma.ru¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению подходов к формированию структуры интеллектуальной системы автоматического управления судовым двигателем. Эта система является элементом повышения надежности системы автоматического управления судовым двигателем с использованием его бортовой нейросетевой модели, обеспечения отказоустойчивости нечеткой интеллектуальной системы управления. В процессе исследования формализована структурная схема системы управления со встроенной искусственной нейронной сетью. Отдельное внимание уделено процессу структурной идентификации нейронной сети судового двигателя. Также описан порядок синтеза адаптивного регулятора в классе нейросетевых структур, обозначены особенности и алгоритм его обучения, методы нахождения управляющих параметров. В статье синтезирована структура интеллектуальной системы автоматического управления судовым двигателем, которая дает возможность устранить человеческие ошибки и избежать несчастных случаев, повысить топливную эффективность судов и как следствие сократить количество вредных выбросов, а также поддерживать профилактическое обслуживание, позволяя обнаруживать сбои оборудования на раннем этапе.

Ключевые слова: судно, интеллектуальная система, адаптивный регулятор, нейронная сеть, управление.

Для цитирования: Епихин А.И., Хекерт Е.В. Формирование структуры интеллектуальной системы автоматического управления судовым двигателем, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 79—84. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.010

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.010>**Formation of the structure of an intelligent system for automatic control of a marine engine**Aleksey I. Epikhin¹ bsmbeton@mail.ru, Evgeniy V. Kheker¹ zur_mga@nsma.ru¹The State Maritime University named Admiral F. F. Ushakov, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the consideration of approaches to the formation of the structure of an intelligent system for the automatic control of a marine engine. This system is an element of increasing the reliability of the ship engine automatic control system using its onboard neural network model, ensuring the fault tolerance of the fuzzy intelligent control system. In the course of the study, a structural diagram of a control system with an embedded artificial neural network was formalized. Special attention is paid to the process of structural identification of the marine engine neural network. The procedure for synthesizing an adaptive controller in the class of neural network structures is also described, the features and algorithm for its learning, methods for finding control parameters are indicated. The article synthesizes the structure of an intelligent ship engine automatic control system, which makes it possible to eliminate human errors and avoid accidents, increase the fuel efficiency of ships and, as a result, reduce harmful emissions, and also support preventive maintenance, allowing equipment failures to be detected at an early stage.

Keywords: ship, intelligent system, adaptive controller, neural network, control.

For citation: Epikhin A.I. Kheker E.V. Formation of the structure of the intelligent system of automatic control of the marine engine, Marine intelligent technologies.. 2023. № 4 part 1, P. 79—84. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.010

Введение

Искусственный интеллект (ИИ), Интернет вещей, бизнес-аналитика, анализ больших данных трансформируют методы и подходы работы морского транспорта, а также сокращают расходы и снижают риск для человеческих жизней. Ведущие судоходные компании внедряют технологии с использованием ИИ, чтобы получить больше информации о работе своих судов, в тоже время как цифровые гиганты, так и стартапы находят новые способы расширить границы использования ИИ при эксплуатации различных судовых установок. Одной из таких сфер является внедрение интеллектуальной системы в контур автоматического управления судовым двигателем.

К числу первых примеров подобных решений на базе искусственного интеллекта относится запатентованная Frugal Technologies интеллектуальная система, которая разрабатывалась с целью снизить расход топлива на судне на 10% при сроке окупаемости менее 18 месяцев. Десять месяцев испытательного плавания с использованием Frugal Propulsion на танкере Endelo Swan показали экономию топлива на 12,2%, что теперь побуждает судоходную компанию Uni-Tankers устанавливать систему на большее количество судов флота. Для многих фидерных судов, судов «РО-РО», танкеров-химовозов и паромов такая экономия соответствует 2-4 тоннам топлива в день [1].

Frugal Propulsion — это интеллектуальная система обучения и управления, которая интегрируется с существующей корабельной системой управления двигателем и обеспечивает постоянную оптимизацию его работы, а также гребного винта по отношению к осадке, нагрузке, волнам и ветру. Ручные настройки в системе отсутствуют. Интеллектуальная система основана на датчиках, больших данных и алгоритмах обучения, которые постоянно совершенствуются. Для судовладельца это означает, что экономия топлива будет увеличиваться по мере того, как система будет получать больше информации об особенностях работы энергетической установки в процессе ее эксплуатации.

Цель и задачи

Рассматриваемая тематика является новой областью исследования как в научно-экспертной среде, так и в практической плоскости, соответственно она имеет еще широкий спектр вопросов и проблемных моментов, которые требуют дополнительного изучения и анализа, что и послужило основой для выбора темы данной статьи.

Ключевые аспекты и возможности повышения надежности системы автоматического управления судовым двигателем с использованием его бортовой нейросетевой модели рассматриваются в работах Непомнящего О.В., Тарасова А. В., Постникова А. И., Яблонского А. П., Jiang, Yong; Wang, Haiyang.

Способы обеспечения отказоустойчивости нечеткой интеллектуальной системы управления судовыми двигателями прорабатываются Жиленковым А. А., Абрамкиной К. В., Епифанцевым И. Р., Yuan, Zhi; Liu, Jinxian.

В тоже время, высоко оценивая достижения современных авторов, следует отметить ряд направлений, которые нуждаются в более полном раскрытии и уточнении. В частности, отдельного внимания заслуживают методы обеспечения на основе интеллектуальных агентов многоуровневой оптимизации потребления топлива, контроля выбросов CO₂ и углерода. В дополнительном развитии нуждается целостная облачная система мониторинга и производительности морских судов на основе ИКТ и Интернета вещей на протяжении всего жизненного цикла судна, которая позволит достичь энергоэффективности, сокращения выбросов и оптимального потребления топлива с учетом внедрения концепций циркулярной экономики в морской сфере.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении подходов к формированию структуры интеллектуальной системы автоматического управления судовым двигателем.

Материалы и методы

Разработанные на сегодняшний день системы автоматического управления (CAU) судовым двигателем основаны на передовых методах программирования, которые дают возможность реализовать дистанционное управление оборотами, нагрузкой, логикой сцепления, а также позволяют осуществлять изохронное распределение мощностей между несколькими двигателями или регулировать нагрузку с понижением скорости. Кроме того, они обеспечивают подачу множества

аварийных сигналов, трендов и сообщений для оператора [2]. Однако, помимо обозначенного достаточно широкого спектра функций САУ, интеллектуальная система автоматического управления (ИСАУ) судовым двигателем должна позволять моделировать нелинейную динамику, точно описывать или управлять сложными стохастическими системами судового двигателя, имея мало априорных теоретических знаний, что позволит превосходить в период переходных процессов схемы управления, которые основаны на статических отображениях.

Таким образом, задачу формирования структуры ИСАУ судовым двигателем можно формализовать следующим образом - разработка отказоустойчивой системы управления на основе нечеткой логики.

На рис. 1 представлена структурная схема ИСАУ судового двигателя со встроенной искусственной нейронной сетью (НС).



Рис. 1 Структурная схема ИСАУ судового двигателя со встроенной НС

В связи с тем, что судовой двигатель является стохастической системой, которая характеризуется пространством разнообразных режимов работы и конфигураций большой размерности, которые имеют предысторию, не представляется возможным предварительно с достаточной степенью достоверности и точности описать все его текущие состояния. Поэтому в данном случае, по мнению автора, целесообразно использовать динамическую модель двигателя, реализованную в компьютерном коде ODECS (Optimal Design of Engine Control Strategies), которая базируется на (многослойном персептроне) с несколькими скрытыми слоями сигмоидальных единиц и линейной функцией активации для выходной единицы [3].

Результаты

Эта модель состоит из различных подмоделей, каждая из которых связана с определенными явлениями в двигателе, сопутствующими оценке его производительности во время переходных операций. В свою очередь структура динамической модели двигателя, для реализации ИСАУ корреспондирует с набором регрессионных моделей черного ящика для оценки расхода топлива и уровня выбросов HC , CO_2 и NO_x .

В каждой точке плоскости скорости вращения двигателя выводится набор полиномиальных регрессий как функции управляющих переменных для расхода топлива и удельного массового объема трех основных выбросов (HC, CO₂, NO_x):

$$m_f^*|_i = f_i(\alpha, \theta) \quad i = 1, N_g \quad (1)$$

$$e_f^j|_i = g_i(\alpha, \theta) \quad i = 1, N_g \quad j = HC, CO_2, NO_x \quad (2)$$

Общая i -ая полиномиальная формула в каждой точке записывается следующим образом:

$$G(\alpha, \theta) = a_0 + b_1\alpha + \dots + b_1\alpha^p + c_1\theta + \dots + c_q\theta^q + d_1\alpha\theta + \dots + d_{r+s}\alpha^r\theta^s \quad (3)$$

где коэффициенты $a_0, b_1 \dots p, c_1 \dots q, d_1 \dots r+s$ находятся по методу наименьших квадратов.

Вышеприведенные уравнения представляют собой модели установившегося режима функционирования судового двигателя для каждого из рабочих условий N_g крутящего момента-скорости, поэтому глобальная модель двигателя принимает дискретную форму. Следовательно, для оценки характеристик в общей точке (T , об/мин) производится билинейная интерполяция четырех ближайших окружающих значений, полученных из уравнений. В связи с нелинейными зависимостями относительно независимых переменных приемлемый уровень точности может быть достигнут только при использовании достаточно плотной экспериментальной сетки с эквидистантными точками, в то время как грубые сетки могут генерировать модели с низкой точностью [4].

Принимая во внимание тот факт, что наблюдаемые параметры работы судового двигателя имеют статистический разброс, то рассчитывая их отклонения следует использовать среднее значение, проведя для этого несколько измерений $j(5 \dots 10)$.

На следующем этапе необходимо определить порядки регрессоров (т.е. пространство запаздывания), а также количество узлов в скрытом слое нейрона для каждой подмодели. Используемый выбор нейронной структуры представлен на рисунке 2.

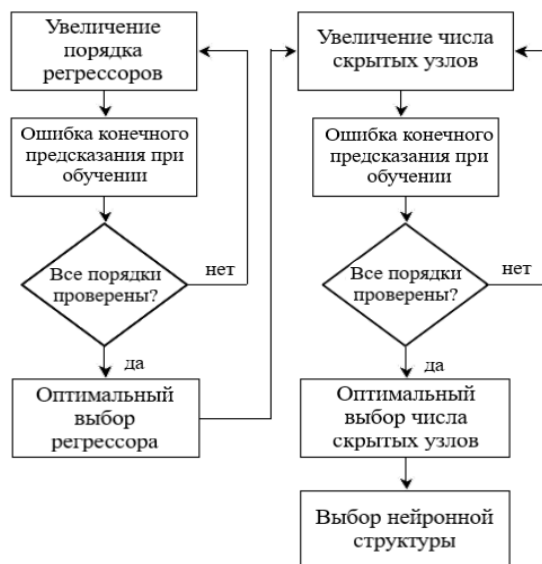


Рис. 2 Процесс структурной идентификации нейронной сети судового двигателя

Для каждого значения порядка нейронная сеть обучается с заданным числом узлов, которое должно быть достаточно большим, и рассчитывается критерий конечной ошибки предсказания (FPE). Оптимальный порядок соответствует минимальному

значению FPE. Затем нейронная сеть обучается с этим порядком, но уже для нескольких значений номера узла в скрытом слое. Снова рассчитывается критерий FPE, и если он дает оптимальный номер узла, соответствующий минимальному значению FPE, то таким образом, формируется окончательная структура сети.

На следующем этапе необходимо разработать нейронный контроллер, который может быть обучен по специальной схеме для достижения целей управления судовым двигателем по заданным параметрам.

Схема работы нейронного контроллера и его обучения для управления судовым двигателем представлена на рис. 3.

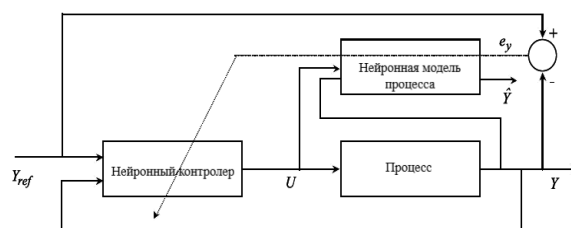


Рис. 3 Архитектура работы нейронного контроллера и его обучения

Согласно представленной на рис. 3 схеме, в нейронном контроллере текущий управляющий вход вычисляется путем решения нелинейной программы для каждого режима и состояния работы судового двигателя. Основная проблема оптимизации состоит в необходимости предсказания поведения системы, начиная с текущего состояния. Выбранная функция затрат сводит к минимуму выбросы на выходе из двигателя, одновременно пытаясь снизить расход топлива и поддерживая требуемый выходной крутящий момент. После этого данные контроллера импортируются в экспериментальную реализацию в режиме реального времени для управления судовым двигателем.

Управляющие параметры (веса нейронного контроллера) обычно обучаются таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов ошибок между эталоном и выходом системы [5]. Основная трудность заключается в том, что для алгоритма минимизации требуется якобиан системы, т.е. производные выхода по отношению к входу, который в большинстве случаев неизвестен. Эта проблема решается путем включения нейронной (прямой) модели системы в схему обучения и оценки якобиана по этой модели.

В данном случае для настройки параметров нейронного контроллера используется рекурсивный алгоритм - подход, очень близкий к адаптивному управлению. Критерий оптимизации определяется в дискретное время t следующим образом:

$$J_t(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^t e_y(W, k)^2 \quad (4)$$

где $e_y(W, k) = Y_{ref}(k) - Y(W, k)$, $Y_{ref}(k)$ и $Y(k)$ - являются соответственно желаемым выходом, т.е. эталонным, и фактическим выходом системы в момент времени k .

Общее правило, которое используется для обновления весов, выглядит следующим образом:

$$W^t = W^{t-1} - \mu_t [R_t(W^{t-1})]^{-1} J'_t(W^{t-1}) \quad (5)$$

где W^t обозначает вектор параметров регулятора $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, обновленный в момент времени t , μ_t - длину шага. Градиент $J'(W)$ критерия определяется по формуле:

$$J'(W) = \left(\frac{\partial J(W)}{\partial w_1} \frac{\partial J(W)}{\partial w_2} \dots \frac{\partial J(W)}{\partial w_n} \right)^T \quad (6)$$

Матрицу $R(W)$ можно выбирать различными способами. В алгоритме наискорейшего спуска $R(W) = I$ (единичная матрица). Этот алгоритм самый простой, но он редко бывает эффективным и несовместим с различиями масштабов, которые могут существовать между параметрами. В алгоритме Гаусса-Ньютона $R(W)$ является аппроксимацией матрицы Гессе (или вторых производных), что позволяет получить более точные результаты.

В качестве примера применения на практике предложенной структуры ИСАУ рассмотрим возможность ее использования для прогнозирования удельного расхода топлива. Для проведения эксперимента был выбран двигатель компании Yuchai серии YC6CNL. Двигатель работал при разном нагружении - 30%, 40%, 50% и 100% с переменной частотой вращения в диапазоне 1500-3500 об/мин и с постоянным шагом 100 об/мин.

Нейронная сеть имела четыре входных параметра: частота вращения двигателя (об/мин), положение дроссельной заслонки, коэффициент соотношения «топливо-воздух» и крутящий момент (Нм), и один выходной параметр: удельный расход топлива. Набор экспериментальных данных включал 84 значения, из которых 44 значения были использованы для обучения сети, 20 значений - для валидации и 20 значений были выбраны случайным образом для проверки работы обученной сети. Все входные и выходные значения были нормированы в диапазоне 0,1-0,9. Валидационные значения использовались для раннего прекращения обучения и во избежание перебора. После 40 циклов обучения уровень погрешности был удовлетворительным, и дальнейшие циклы не оказали существенного влияния на снижение погрешности тестирования (см. рис. 4).

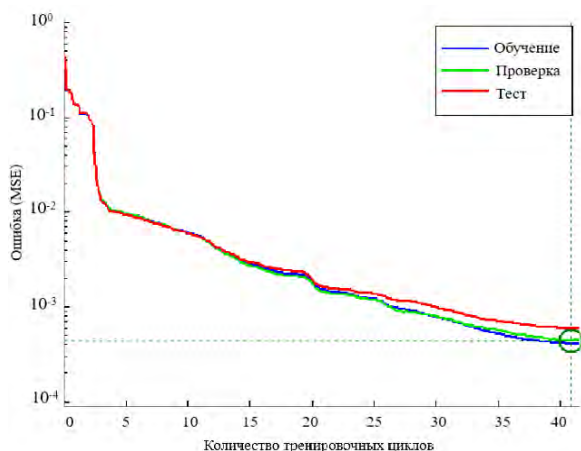


Рис. 4 Циклы обучения нейронной сети

В процессе обучения нейронной сети в скрытом слое использовалось увеличенное количество нейронов (с 3 до 12) с целью точного определения выхода для алгоритмов пакетного градиентного спуска (GD), устойчивой обратной пропегации (RP), Левенберга-Марквардта (LM), пакетного градиентного спуска с импульсом (GDM), переменной скорости обучения (GDX), масштабированного сопряженного градиента (SCG).

Показатели GD и GDM оказались неудовлетворительными. Точность алгоритмов RP, GDX и SCG показала хороший результат, но недостаточную согласованность с количеством скрытых нейронов. Алгоритм LM продемонстрировал хорошую точность и согласованность при изменении числа скрытых нейронов. Таким образом, лучшим оказался алгоритм LM с 10 скрытыми нейронами. В табл. 1 приведены статистические значения выходов для этого алгоритма для данных обучения, валидации и тестирования.

Таблица 1

Производительность алгоритма LM

Процедура	R ²	Среднеквадратичное отклонение (гм/кВт-ч)	Средняя ошибка (%)
Обучение	0.999998	0.040	0.090
Валидация	0.999996	0.223	0.207
Тест	0.999931	0.242	0.224

На рис. 5 графически показаны фактические и прогнозируемые результаты обучения и тестирования нейронной сети.

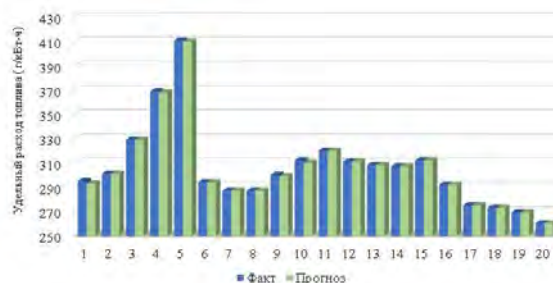


Рис. 5 Сравнение фактических и прогнозных значений для данных испытаний по расходу топлива

Итак, прогноз искусственной нейронной сети для удельного расхода топлива дает среднюю относительную ошибку 0,224%, среднеквадратичную ошибку 0,242 г/кВт-ч и коэффициент корреляции 0,999931. Эти значения показывают, что нейронная сеть судового двигателя достаточно хорошо прогнозирует удельный расход топлива, несмотря на широкий диапазон условий эксплуатации. Очевидно, что ее эффективность была бы еще выше, если бы было проведено большее количество тестовых испытаний, это позволило бы получить больший объем экспериментальных данных для обучения сети.

Выводы

Резюмируя результаты проведенного исследования отметим, что в статье предложена структура ИСАУ судовым двигателем, которая дает возможность устранить человеческие ошибки и избежать несчастных случаев благодаря тому, что позволяет с меньшими затратами осуществлять прогнозирование характеристик двигателя вместо

проведения сложных и трудоемких экспериментальных исследований. Также применение ИСАУ открывает широкие возможности для повышения топливной эффективности судов, за счет принятия оперативных решений на основе накопленных знаний в условиях неопределенности и адаптации, а также для поддержки профилактического обслуживания, позволяя обнаруживать сбои оборудования на раннем этапе.

Литература

1. Gaber, Mohab Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system. Energy reports. 2021. Volume 7; pp 7989-7998.
2. Ямалов И.И. Экспериментальные исследования интеллектуальной системы управления двигателем внутреннего сгорания на основе нечетких динамических моделей. Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-2. С. 326-330.
3. Полковникова Н.А. Система поддержки принятия решений для выбора режима и прогнозирования отказов главного судового двигателя. Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 3 (92). С. 170-180.
4. Components for Smart Autonomous Ship Architecture Based on Intelligent Information. Technology Procedia computer science. 2018. No. 134; pp 91-98.
5. Lan, Feng Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine Journal of physics. Conference series. 2020. Volume 1670; pp 23-28.
6. Боран-Кешишьян А. Л., Астреин В. В., Кондратьев С. И. Формализация общей стратегии принятия решений для достижения комплексной безопасности судна. 2019. № 1-2(43). С. 127-131. EDN SCNJDN.
7. Жук А. С., Кондратьев С.И. Методы управления судном на основе множеств достижимости Навигация и гидрография. 2013. № 36. С. 29-37. EDN SAFKID.
8. Боран-Кешишьян А. Л., Заморенов М. В., Флоря П. Н. Функционирование технической системы с мгновенно пополняемым резервом времени с учетом профилактики / [и др.] 2021. № 4-1(54). С. 258-264. DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.061. EDN PMMOHM.

References

1. Gaber, Mohab Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system. Energy reports. 2021. Volume 7; pp 7989-7998.
2. Yamalov I.I. Experimental studies of an intelligent internal combustion engine control system based on fuzzy dynamic models. Modern high-tech technologies. 2020. No. 11-2. pp. 326-330.
3. Polkovnikova N.A. Decision support system for selecting the mode and predicting failures of the main marine engine. Operation of marine transport. 2019. No. 3 (92). pp. 170-180.
4. Components for Smart Autonomous Ship Architecture Based on Intelligent Information. Technology Procedia computer science. 2018. No. 134; pp 91-98.
5. Lan, Feng Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine Journal of physics. Conference series. 2020. Volume 1670; pp 23-28.
6. Boran-Keshishyan A. L., Astrein V. V., Kondratiev S. I. Formalization of the general decision-making strategy for achieving integrated ship safety. 2019. No. 1-2(43). pp. 127-131. EDN SCNJDN.
7. Zhuk A. S., Kondratiev S.I. Ship management methods based on reachability sets Navigation and hydrography. 2013. No. 36. pp. 29-37. EDN SAFKID.
8. Boran-Keshishyan A. L., Zamorenov M. V., Florya P. N. Functioning of a technical system with an instantly replenished time reserve taking into account prevention / [et al.] 2021. No. 4-1(54). pp. 258-264. DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.061. EDN PMMOHM.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Епихин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственной морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т. Ленина, 93, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Aleksey I. Epikhin, Ph.D., assistant professor, assistant professor of the Department "Operation of Ship Mechanical Installations", Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Хекерт Евгений Владимирович, 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

Evgeniy V. Kheckert, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, e-mail: zur_mga@nsma.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.10.2023.

Научная статья

УДК 532.5: 621.039

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.011>

Актуальные теплофизические исследования в целях совершенствования судовых ядерных энергетических установок

Митрофанова О.В.^{1,2} omitr@yandex.ru, Ивлев О.А.² Ivlev_OA@nrcki.ru¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ²НИЦ «Курчатовский институт».

Аннотация. Рассмотрены физические факторы и условия, приводящие к формированию устойчивых вихревых структур во внутренних турбулентных закрученных течениях, имеющих место в сложных каналах судовых ядерных энергетических установок. Целью проводимых исследований является научное обоснование способов повышения теплогидравлической эффективности и надежности работы судовых ядерных энергетических установок нового поколения, обеспечивающих повышенный ресурс безопасной эксплуатации ЯЭУ в течение срока, приближенного к сроку службы судна.

Привлечение анализа термодинамической устойчивости для описания закрученных потоков дало возможность объяснить механизм генерации крупномасштабных вихреобразований и определить критические условия возникновения детерминированной вихревой структуры турбулентных течений в каналах сложной геометрии. Представлены результаты расчетно-теоретического моделирования процессов вихреобразования при течении высокоскоростных потоков в каналах переменного сечения, являющихся элементами коллекторных и трубопроводных систем судовых ЯЭУ. Проявление кризиса закрученного потока рассмотрено на примерах моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в каналах парогенераторов и системы компенсации давления судовых ЯЭУ. Показано, что генерация устойчивых вихреобразований в элементах оборудования ЯЭУ интегрального типа может быть непосредственно связана с механизмом возбуждения опасных вибро-резонансных эффектов. Предложен способ интенсификации теплообмена в парогенерирующих каналах за счет применения витых труб овального профиля. Полученные результаты вычислительных экспериментов показали, что реализация режима, соответствующего кризису закрученного течения, приводит не только к резкому повышению гидравлических потерь, что снижает теплогидравлическую эффективность работы установки, но и к генерации акустических колебаний, что может быть связано с появлением опасных резонансных эффектов, ведущих к развитию прочностных дефектов и аварийным ситуациям.

Ключевые слова: судовые ядерные энергетические установки, гидродинамика, теплообмен, моделирование, вычислительные эксперименты, оптимизация, коллектор, трубные системы, парогенератор.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РНФ № 23-29-00373

Для цитирования: Митрофанова О.В., Ивлев О.А. Актуальные теплофизические исследования в целях совершенствования судовых ядерных энергетических установок, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 85—94. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.011

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.011>

Current thermophysical research in order to improve shipboard nuclear power installations

Olga V. Mitrofanova^{1,2} omitr@yandex.ru, Oleg A. Ivlev² Ivlev_OA@nrcki.ru¹National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation, ²National Research Center Kurchatov Institute, Russian Federation

Abstract. Physical factors and conditions leading to the formation of stable vortex structures in internal turbulent swirling currents occurring in complex channels of shipboard nuclear power plants are considered. The purpose of the research is the scientific substantiation of ways to increase the thermal-hydraulic efficiency and reliability of the ship's nuclear power plants of a new generation, providing an increased resource for the safe operation of nuclear power plants for a period close to the service life of the vessel.

The use of thermodynamic stability analysis to describe swirling flows made it possible to explain the mechanism of generation of large-scale vortex formations and to determine the critical conditions for the emergence of a deterministic vortex structure of turbulent flows in channels of complex geometry. The results of computational and theoretical modeling of vortex formation processes during the flow of high-speed flows in channels of variable cross-section, which are elements of collector and pipeline systems of marine nuclear power plants, are presented. The manifestation of the swirling flow crisis is considered on the examples of modeling the processes of hydrodynamics and heat transfer in the channels of steam generators and the pressure compensation system of marine nuclear power plants. It is shown that the generation of stable vortex formations in the elements of the integrated type nuclear power plant equipment can be directly related to the mechanism of excitation of dangerous vibro-resonance effects. A method for intensifying heat exchange in steam generating channels through the use of oval-shaped twisted tubes is proposed. The obtained results of computational experiments have shown that the implementation of the regime corresponding to the crisis of the swirling flow leads not only to a sharp increase in hydraulic losses, which reduces the thermal-hydraulic efficiency of

the installation, but also to the generation of acoustic vibrations, which may be associated with the appearance of dangerous resonant effects leading to the development of strength defects and emergency situations.

Keywords: marine nuclear power installations, hydrodynamics, heat transfer, modelling, computational experiments, optimization, collector, pipe systems, steam generator

financial Support: The work was supported by the Russian Science Foundation: RSF grant no. 23-29-00373

For citation: Olga V. Mitrofanova, Oleg A. Ivlev, Current thermophysical research in order to improve shipboard nuclear power installations, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 85—94. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.011

Введение

Стоящая перед нашей страной актуальная проблема освоения Арктики неразрывно связана с развитием судовой ядерной энергетики. Необходимость обеспечения безотказной работы судовой ЯЭУ в динамических режимах при маневрировании судна выдвигает на первый план следующие направления теплофизических исследований в области гидродинамики и теплообмена:

- выявление механизмов генерации закрутки потока и вихревой структуризации течений в сложных каналах многоконтурной циркуляции теплоносителя и рабочих сред и их влияния на безопасность и надежность работы судовых ЯЭУ;
- выявление причин, вызывающих эффект снижения теплогидравлической эффективности ЯЭУ при повышении мощности ядерного реактора, и предложение способов его устранения;
- исследование механизмов генерации акустических колебаний и вибро-резонансных эффектов в теплогидравлическом контуре и других системах ЯЭУ.

В элементах теплогидравлического тракта судовых ядерных энергетических установок интегрального типа исключение резонансных эффектов связано с необходимостью изучения процессов, приводящих к возникновению устойчивых вихреобразований в каналах сложной геометрии и генерации частот акустических колебаний теплоносителя в области звукового и инфразвукового диапазона, близких к собственным частотам элементов ЯЭУ.

Широкий диапазон изменения мощностных режимов работы судовых ЯЭУ требует разработки надежных методов контроля переходных процессов для предотвращения развития вибрационных процессов, т.к. при совпадении частот акустических колебаний теплоносителя, обусловленных генерацией устойчивых вихреобразований в элементах теплогидравлического контура с собственными частотами элементов внутрикорпусных устройств ЯЭУ может существовать опасность возникновения резонансных эффектов, а также режимов термоциклирования, приводящих к снижению прочностных характеристик теплообменных поверхностей, межконтурным течениям и другим негативным последствиям.

1. Влияние геометрических факторов на формирование крупномасштабной вихревой структуры потока

К явлениям, связанным с изменением внутренней вихревой структуры однофазного потока жидкости, можно отнести случаи структуризации течений с образованием так называемых вторичных течений - вихрей Тейлора, Тейлора-Гертлера, Дина и др. [1]. Характерной чертой этих явлений является их

кризисное проявление, т.е. наличие экспериментально выявленных критических условий, при которых происходит структурная перестройка поля течения с образованием устойчивых вихревых структур.

Предшествующие экспериментально-теоретические исследования, результаты которых представлены, в частности, в работах [1 - 4], показали, что определяющим фактором в формировании крупномасштабной вихревой структуры потока является сложная геометрия различных элементов теплогидравлического тракта ЯЭУ, включающего в себя реакторную установку (РУ), коллекторную систему, парогенераторы и систему компенсации давления (КД). В качестве примеров на рисунках 1, 2 показаны реакторная установка нового поколения РИТМ-200 и парогенератор змеевикового типа ПГ-28, представляющие собой сложные гидромеханические системы, внутренние связи в которых обеспечиваются циркуляцией потоков теплоносителя и рабочих сред по криволинейным каналам циркуляционных контуров.

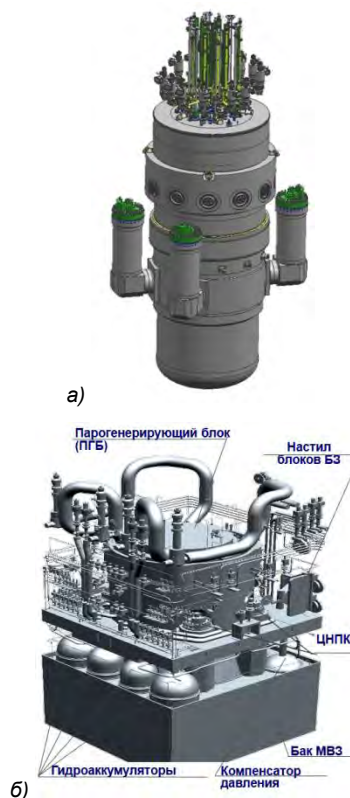


Рис. 1. Реакторная установка РИТМ-200: а) – общий вид, б) - реакторный блок РУ РИТМ-200

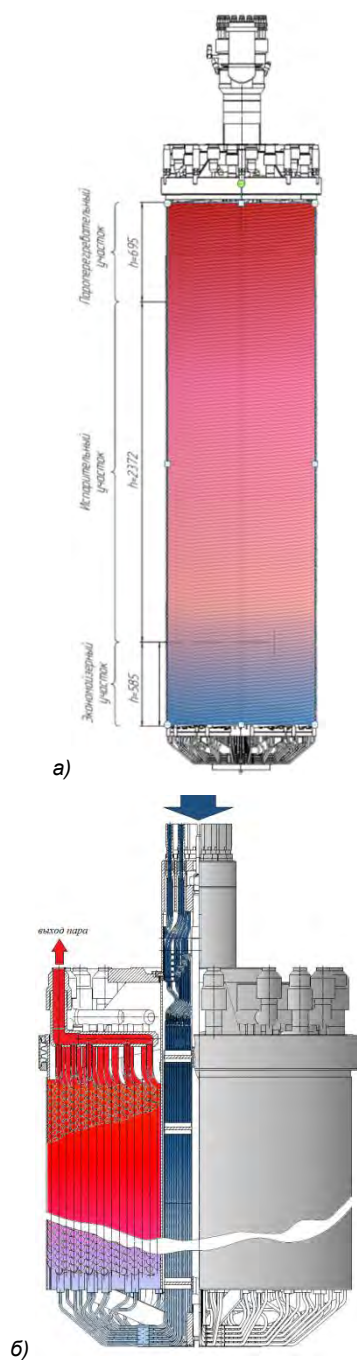


Рис. 2. Конструкция судового парогенератора ПГ-28:
а) общий вид с соотношением размеров
экономайзерной, испарительной и
пароперегревательной зон; б) разрез с компоновочной
схемой трубного пучка

Анализ экспериментальных данных, проведенный в работах [5, 6], показал, что общим для раздающих коллекторных систем реакторов типа ВВЭР с водяным охлаждением является относительно низкая интенсивность процесса перемешивания петлевых потоков теплоносителя. Благодаря многолетним систематическим исследованиям, к настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, обнаруживающий существенное влияние

геометрических параметров напорных коллекторов, а также теплофизических свойств и режимов течения теплоносителей корпусных ядерных реакторов на процесс генерации крупномасштабных вихрей, приводящих к неравномерности расхода теплоносителя на входе в активные зоны реакторов [1, 7-9]. Характерной особенностью исследованных коллекторных систем, отличающихся наличием пространственного поворота на 180° между опускным и подъемным участками движения теплоносителя, является обнаруженная детерминированная вихревая структура потока, указывающая на наличие устойчивых крупномасштабных вихрей, размеры и количество которых зависят от геометрических параметров области течения.

2. Результаты вычислительных экспериментов

В настоящем разделе представлены некоторые результаты расчетно-теоретических исследований по моделированию процессов гидродинамики и теплообмена в элементах теплогидравлического тракта судовой паропроизводящей установки (ППУ). В качестве объектов моделирования выбраны участки циркуляции теплоносителя в напорном коллекторе и трубопроводной системе КД первого контура и в трубной парогенерирующей системе второго контура, геометрия которых может приводить к генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований, обуславливающих появление широкого спектра частот акустических колебаний теплоносителя и рабочего тела.

2.1. Вихреобразование в коллекторной системе

Расчеты трёхмерных распределений полей скорости и давления для упрощённой модели напорного коллектора реакторной установки Ритм-200 проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ с помощью программного пакета ANSYS CFX.

Размеры ячеек в пристеночных областях выбирались, исходя из заданного числа Рейнольдса, геометрических данных и теплофизических свойств водного теплоносителя (вязкость, плотность) так, чтобы узлы ближайших к стенкам ячеек попадали в логарифмический подслой, и можно было использовать стандартные пристеночные функции. Повышение точности расчётов вблизи обтекаемых поверхностей обеспечивалось сгущением расчётной сетки. Для замыкания использовались различные модели турбулентности, что дает возможность сравнительного анализа результатов и выбора наиболее приемлемой расчетной модели на основе сопоставления с экспериментами или, при их отсутствии, с альтернативными аналитическими оценками.

Рассматривалось несколько тестовых задач, соответствующих случаям течения, которые могут иметь место при петлевом подключении, пусковом и переходных режимах работы реактора, из-за возникновения закручивающего момента за счёт конструктивных особенностей или из-за рассогласованности работы насосов.

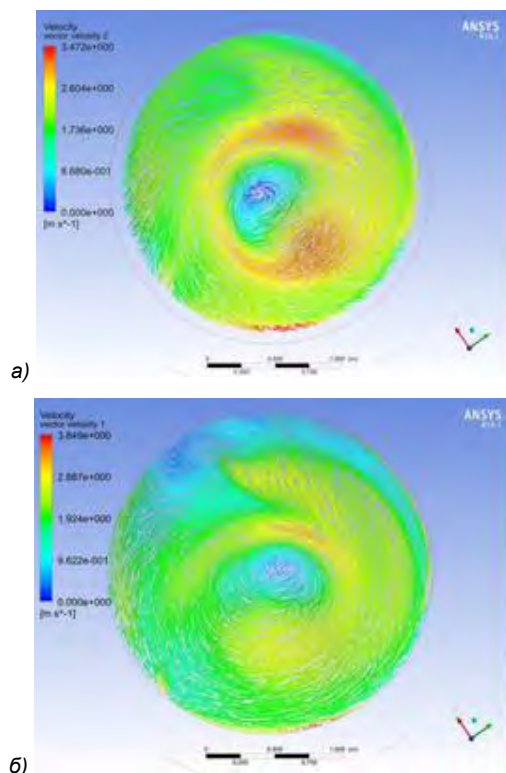


Рис. 3. Распределение тангенциальной скорости в напорном коллекторе РУ Ритм-200 при дисбалансе распределения расхода теплоносителя в петлевых подводах на 12,5%: а) - в поперечном сечении на расстоянии 0,2 м под активной зоной, б) – на входе в активную зону

Вычислительные эксперименты показали, что результаты расчетов, проведенных с использованием различных моделей турбулентности, хотя и имеют различия, но, вместе с тем, указывают на один и тот же качественный результат: при выбранной схеме подвода теплоносителя в напорном коллекторе должны возникать крупномасштабные вихри, частота вращения в которых и амплитуда генерируемых ими колебаний зависят от выбранной геометрии и величины расхода теплоносителя. На основе сравнительного анализа применимости моделей турбулентности можно сделать вывод, что наиболее адекватными являются результаты, полученные при использовании модели Shear Stress Transport.

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены результаты расчетов скоростного поля теплоносителя при неравномерном распределении расхода по петлевым подводам.

Рис. 3 показывает, что при дисбалансе распределения расхода воды в петлевых трубопроводах на 12,5% при неизменном общем расходе формируется один мощный вертикальный вихрь с тангенциальной скоростью, сравнимой по порядку величины со средней расходной скоростью в поперечных сечениях под активной зоной. Это может приводить к снижению расхода теплоносителя в самой энергонапряженной центральной части активной зоны [1] и генерации низкочастотных акустических колебаний, сравнимых с собственными частотами реакторной установки.

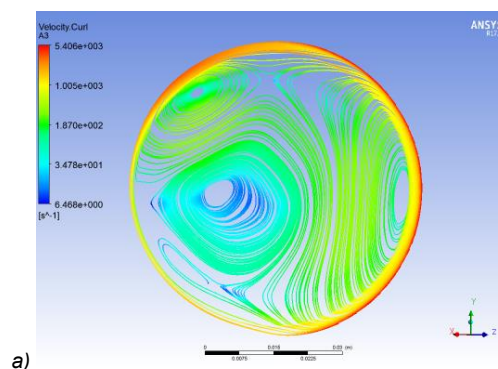
2.2. Влияние пространственной геометрии трубопровода системы компенсации давления на вихревую структуру потока

Анализ данных многолетних теплофизических измерений, снятых при мониторинге различных режимов работы судовых ЯЭУ показал, что в некоторых случаях были зафиксированы аномальные распределения температуры в трубопроводных системах компенсации давления (КД). В предпринятых исследованиях удалось показать, что это явление связано с формированием устойчивых крупномасштабных вихреобразований. С помощью проведенных вычислительных экспериментов было установлено, что физические условия, способствующие генерации закрутки потока и возникновению локальных температурных аномалий в системах КД связаны с наличием конструктивных элементов, способствующих генерации закрутки и сочетающих в себе диффузное расширение проходного сечения и изгибы каналов [10].

Процесс возникновения крупномасштабных вихреобразований, приводящий к генерации низкочастотных акустических колебаний в трубопроводной системе КД, был рассмотрен на примере моделирования турбулентного течения воды на участке трубопровода сложной геометрии для случаев скачкообразного повышения и понижения мощности реакторной установки. Соответствующие этим случаям две серии вычислительных экспериментов были условно названы «горячей» и «холодной» задачами.

Результаты расчетов показали, что в обоих случаях при условиях «горячей» и «холодной» задач в конечном по ходу течения теплоносителя сечении трубопровода формируется закрученное течение в масштабе всего поперечного сечения канала, интенсивность которого зависит от скорости изменения мощности реакторной установки. При этом угловая скорость вращения потока может быть сравнима с собственной частотой работы насосов.

Результаты, представленные на рис. 4, иллюстрируют взаимосвязь между полем завихренности и полем температур в поперечном сечении элемента трубной системы компенсатора давления.



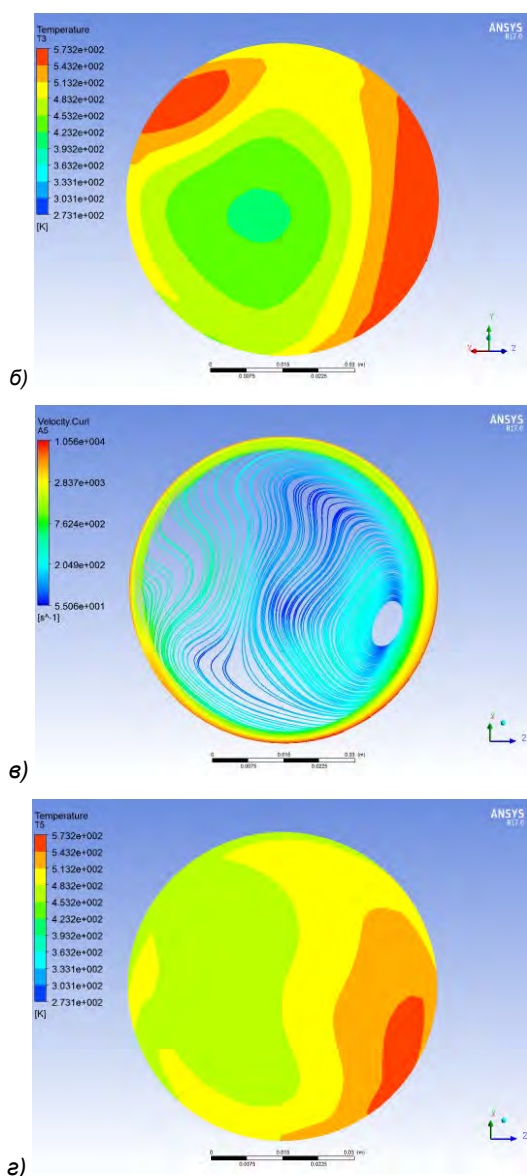


Рис. 4. Распределения полей на участке трубопровода КД: а) завихренности – в горизонтальном гйбе, б) температуры – в горизонтальном гйбе, в) завихренности – в вертикальном гйбе, г) температуры – в вертикальном гйбе.

Полученные в расчетах 3-х мерные картины скоростного поля течения указывают на формирование зон реверсивного (возвратного) закрученного течения – крупномасштабного вихреобразования, топологически соответствующего так называемой вихревой или гидравлической пробке [11]. Именно возникновением этого гидродинамического эффекта, соответствующего режиму кризиса закрученного потока [12, 13], удалось объяснить аномальную стратификацию температурного поля в трубопроводной системе компенсации давления, когда наблюдается перетекание более холодного слоя теплоносителя над горячим.

Расчеты также показали, что в рассматриваемом элементе конструкции трубопровода КД, сочетающем в себе участок конфузотно-

диффузотно-переменного сечения с последующим изгибом при определенном изменении мощности ядерного реактора поле течения становится существенно нестационарным. При этом характер его изменения указывает на формирование автоколебаний, что, в свою очередь, может порождать нарастание вибрационного процесса как в самой системе компенсации давления, так и в других элементах судовой ЯЭУ.

2.3. Влияние эффектов вихреобразования на теплогидравлическую эффективность парогенерирующей установки

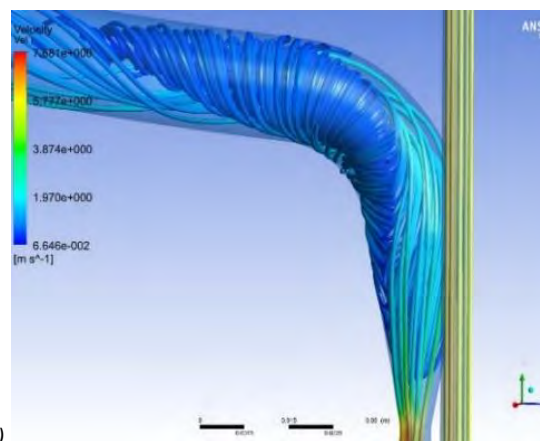
Эффект снижения теплогидравлической эффективности паропроизводящей установки (ППУ) при повышении тепловой мощности ядерного реактора (ЯР) был выявлен на основании данных мониторинга эксплуатационных режимов судовых ЯЭУ. Суть этого эффекта заключается в следующем. Измерения показали, что в интервале работы ядерного реактора (ЯР) на мощности в интервале от 10% до 50 % от номинальной ($N_{\text{ном}} = 100\%$) температура перегретого пара растет линейно, следуя за повышением температуры теплоносителя первого контура на входе в парогенератор, но при дальнейшем повышении мощности ядерного реактора от 50% до 100% $N_{\text{ном}}$, изменение температуры перегретого пара приобретает нелинейный характер: вначале рост её прекращается, а затем происходит резкое снижение, достигающее минимального значения при 100% $N_{\text{ном}}$. При этом разница между температурой греющего теплоносителя первого контура и температурой перегретого пара резко возрастает. Соответственно, падение энтальпии перегретого пара приводит к снижению термического КПД паропроизводящей установки. В то же время, увеличение мощности ЯР выше 50% связано с нелинейным возрастанием нагнетаемого давления питательной воды на входе во второй контур, чтобы поддержать неизменное давление перегретого пара на выходе из парогенератора, что приводит к росту гидравлических потерь.

Объяснение наблюдаемого негативного эффекта снижения термического КПД ППУ и увеличения потерь давления при повышенной мощности ядерного реактора также связано со сложной геометрией теплогидравлического тракта второго контура ЯЭУ. Проведенные расчетно-аналитические исследования показали, что при геометрии парогенерирующих каналов, имеющих не только трехмерную кривизну, т.е. изгибные участки с кривизной в различных плоскостях, змеевиковую геометрию, но и переменную площадь проходного сечения каналов, создаются условия, приводящие к крупномасштабному вихреобразованию и закрутке потока. При этом реализуется не только режим закрученного течения, но и эффект, который был назван кризисом закрученного потока. Приоритет открытия данного явления принадлежит академику И.И. Новикову и заключается в подтверждении того факта, что критическая скорость поступательного движения закрученного потока вязкой несжимаемой жидкости равна скорости распространения длинных центробежных волн [12, 13].

Обоснованная в работе [1] модель трансформации вихря и полученные для ее

замыкания аналитические соотношения, дают возможность определить условия, приводящие к «запиранию» расхода рабочего тела, связанного с наступлением кризиса закрученного течения [12, 13]. Физически явление кризиса выражается в образовании области реверсивного спирально-винтового течения, занимающего основную часть проходного сечения канала.

На рисунке 5 представлены результаты численных расчетов с использованием программного комплекса ANSYS и модели турбулентности $k-\omega$ SST. Характерная геометрия участка одиночного канала парогенератора в области разворота потока от нисходящего к восходящему направлению движения приведена на рис. 5а. Рис. 5б иллюстрирует тот факт, что после прохождения двух вертикальных изгибов при переходе из опускного к восходящему направлению движения питательной воды, (где формируется устойчивая вихревая структура потока, состоящая из двух спиральных вихрей равной интенсивности, но противоположного направления вращения – вихрей Дина), при последующем движении жидкости через расширяющуюся диффузорную часть канала, заканчивающуюся горизонтальным изгибом, течение приобретает однонаправленную закрутку в масштабе всего канала.



в)

Рис. 5. Генерация закрутки потока на экономайзерном участке парогенерирующего канала: а) – геометрия канала и линии тока движущейся жидкости в зоне подогрева питательной воды перед испарительным участком; б) – распределения тангенциальной составляющей скорости потока в зоне расширения проходного сечения канала

Вариантные расчеты показали, что степень диффузорного расширения криволинейного канала существенным образом влияет на интенсивность вихревого движения в области рециркуляции потока, а, следовательно, на возрастание гидравлических потерь.

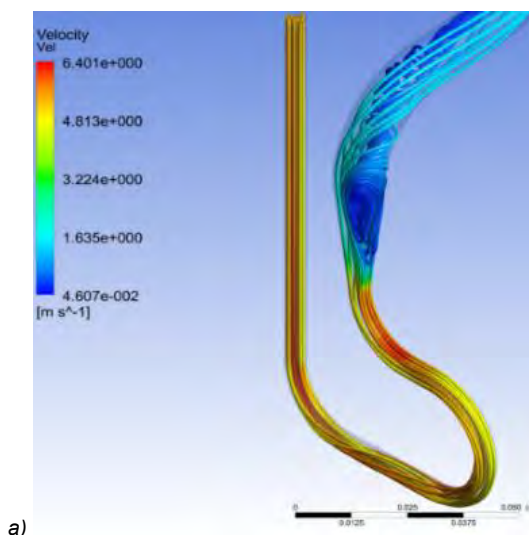
Проведенные расчетно-теоретические исследования и сравнение с данными мониторинга эксплуатационных режимов судовых ППУ, свидетельствуют о том, что эффект снижения теплогидравлической эффективности непосредственно связан с реализацией условий, соответствующих наступлению кризисного режима течения закрученного потока.

3. Решение оптимизационных задач

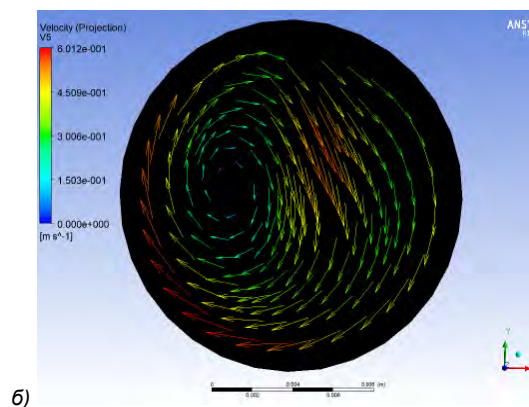
Вопрос о возможности решения оптимизационных задач в целях повышения безопасности и эффективности работы ядерных реакторов и теплообменного оборудования судовых ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) напрямую связан с выбором критерия эффективности. В монографии [1] было показано, что выбор критерия эффективности зависит от цели оптимизации и не является однозначным.

В качестве элементов судовых ЯЭУ, массогабаритные характеристики которых могут быть оптимизированы, могут быть рассмотрены как коллекторные системы и устройства активной зоны ядерного реактора, так и теплоэнергетическое оборудование второго и других контуров (парогенераторы, теплообменники, и т.п.). Возможность повышения теплогидравлической эффективности и работоспособности ЯЭУ в целом зависит также от надежной работы таких систем, как системы охлаждения оборудования электрогенерирующих и паропроизводящих установок (ППУ), подогревателей питательной воды, дроссельно-увлажнительных устройств, трубных систем конденсаторов ППУ, маслоохладителей и т.д., характеристики которых также могут быть значительно улучшены за счет использования интенсификации теплообменных процессов.

Для определения критерия теплогидравлической эффективности применительно к парогенераторам



а)



б)

транспортных ЯЭУ могут быть использованы результаты работ [14-16] и рекомендовано соотношение двух параметров: тепловой мощности $Q_T = \alpha F \Delta t$, отнесенной к единице объема и единичной разности температур

($Q_T / (V \Delta t) = \alpha F / V$) и мощности на прокачку рабочего тела N , отнесенной к единице объема V аппарата (N/V). В этом случае оценка эффективности аппарата с оптимизированной геометрией каналов по сравнению с действующим прототипом может быть выражена критерием (1):

$$\Psi = \left(\frac{\alpha F}{N} \right) / \left(\frac{\alpha_0 F_0}{N_0} \right), \quad (1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи к рабочему телу 2-го контура, F - площадь поверхности теплообмена; индекс «0» относится к прототипу.

Критерий Ψ должен быть больше единицы в случае положительного эффекта оптимизации за счет уменьшения потерь мощности на прокачку рабочей среды. Это может быть достигнуто за счет совершенствования конструкций трубных систем судовых ЯЭУ с устранением зон реверсивного закрученного течения (вихревых пробок).

Значение критерия Ψ может также возрастать за счет дополнительной интенсификации теплообмена. Одним из способов интенсификации с целью повышения критерия теплоэнергетической эффективности Ψ может быть применение на участках с ухудшенным теплообменом, к которым можно отнести экономайзерную и пароперегревательную зоны, каналов и пучков витых труб сложной геометрии. Интенсификация теплообмена в таких каналах достигается за счет одновременного действия двух факторов: увеличения площади теплообменной поверхности и генерации закрутки потока.

На рис. 3 представлены примеры расчета полей температуры в сечениях витых труб крестообразного и овального профиля на длине 0,5 м от входа в пароперегревательный участок. В результате сравнения данных, полученных на пароперегревательном участке при расчетных исследованиях тепломассообмена в витых парогенерирующих каналах овальной и крестообразной формы, с опытными данными для каналов круглого сечения, был выявлен эффект увеличения коэффициента теплопередачи на 10 ÷ 12% за счет более высоких коэффициентов теплоотдачи, как внутри, так и снаружи витых труб [17].

В работе [17] было установлено, что для исследованного диапазона углов закрутки витых труб $18^\circ \div 30^\circ$ величина коэффициента теплоотдачи для перегретого пара при течении в трубах овального профиля систематически превышает значение коэффициента теплоотдачи в витых трубах крестообразного профиля. Верификация расчетных результатов осуществлялась на основе сравнения с результатами исследований, проведенных под руководством Г.А. Дрейцера для использования сборок витых труб в воздухо-воздушных теплообменниках работ [14].

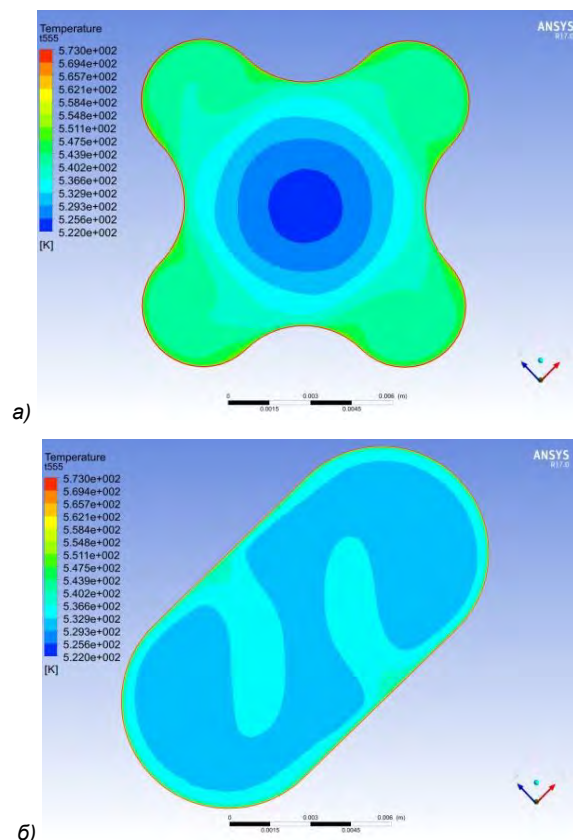


Рис. 6. Результаты расчета температуры перегретого пара в обогреваемых витых каналах а) крестообразного и б) - овального профиля.

4. Генерация акустических колебаний

Механизм генерации акустических колебаний, связанный с образованием в движущейся среде устойчивых вихревых структур был рассмотрен на примере импактного закрученного течения [17]. Экспериментальные исследования по выявлению взаимосвязи крупномасштабного вихревого движения с акустическими эффектами в гидромеханических системах показали, что при достижении предельной расходной скорости закрученного потока происходит перестройка амплитудно-частотной характеристики акустических колебаний гидромеханической системы. Сопоставление амплитудно-частотных характеристик акустических колебаний с картинами визуализации вихревой структуры потоков и результатами численного моделирования позволило выявить топологические особенности импактного закрученного течения [17]. Установленная связь между генерацией звуковых колебаний и геометрическими и режимными параметрами гидромеханической системы легла в основу разработанного метода диагностики процессов вихреобразования [18].

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов с использованием приближения акустического течения и теории винтовых потоков позволило предложить физическую модель течения, объясняющую появление резонансных эффектов. Предлагаемый метод акустических резонансов может являться эффективным дополнением к существующим методам виброшумовой диагностики

в целях выявления опасных эксплуатационных режимов работы ядерных энергетических установок, связанных с процессами спонтанного вихреобразования и самопроизвольной закрутки потоков теплоносителей, а также с фазовыми переходами, сопровождающими несанкционированное вскипание теплоносителя или кавитационные эффекты.

В серии экспериментов, проведенных для обоснования разработанного метода, был выявлен эффект саморегулирования акустических колебаний. Обнаруженный эффект саморегулирования выражается в резонансном усилении амплитуды собственных частот гидромеханической системы за счет поглощения составляющей спектра акустических колебаний, генерируемых вихревой структурой потока. В элементах теплоэнергетического оборудования ЯЭУ подобное явление может привести к резкому увеличению уровня вибраций и, как следствие, к ослаблению прочностных характеристик конструкций.

Заключение

Разработаны принципы расчетного моделирования и диагностического метода для

научного обоснования оптимальных компоновочных решений, обеспечивающих повышенный ресурс эксплуатации судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) нового поколения с реакторными установками интегрального типа.

Выявлены механизмы генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований и закрутки потока в сложных каналах теплогидравлического тракта судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Показано, что при сложной геометрии каналов трубных систем теплогидравлического тракта и реакторной установки (РУ) возникающая в определенных динамических режимах несанкционированная закрутка может приводить к эффекту заклинивания потока, обусловленному кризисом закрученного течения. Установлено, что явление кризиса сопровождается генерацией низкочастотных акустических колебаний и большими потерями давления, требующимися для формирования зоны рециркуляционного течения, препятствующего расходу текущих сред в сложных каналах ЯЭУ.

Литература

1. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 288 с.
2. Митрофанова О.В. Комплексные исследования эффектов генерации крупномасштабных вихреобразований в теплоносителях ядерных реакторов Часть I. Теоретические исследования // Ядерная физика и инжиниринг, 2010, Т. 1., № 4, С. 299-309.
3. О.В. Митрофанова, И.Г. Поздеева, А.Б. Круглов, В.Б. Круглов. Комплексные исследования эффектов генерации крупномасштабных вихреобразований в теплоносителях ядерных реакторов. Часть II. Экспериментальные исследования импульсных закрученных течений течений // Ядерная физика и инжиниринг, 2012, том 3, № 2, с.112-119.
4. О.В. Митрофанова, Ю. Н. Токарев. Влияние геометрических факторов на формирование детерминированных вихревых структур в коллекторах реакторов с жидкометаллическим охлаждением // "Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах". Сборник докладов межотраслевой тематической конференции "Теплофизика-2005", 16-18 ноября 2005 г., г. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ; Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 2006, 1.13, 9 с.
5. Гидродинамика и безопасность ядерных энергетических установок /Сборник трудов ФЭИ в трех томах. Том 2. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1999, 388 с.
6. Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г., Логвинов С. А., Ульяновский В.Н. Исследование перемешивания потоков теплоносителя в корпусе ВВЭР // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып. 6. С. 432 - 440.
7. Патрашев А.Н. Турбулентные течения в потоках жидкости с крупными локальными вихреобразованиями / В сб. "Механика турбулентных потоков", 1980. - С. 166-187.
8. Гусев Б.Д., Калинин Р.И., Благовещенский А.Я. Гидродинамические аспекты надёжности современных энергетических установок. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние. 1989. - 216 с.
9. Г.Ф. Ипатов, А.С. Трофимов, В.Ю. Лихашва, В.Я. Кумаев, Ю.С. Юрьев. Влияние геометрических и режимных параметров цилиндрического раздаточного коллектора на выходную неравномерность профиля расхода теплоносителя // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология. - М.:ЦНИИатоминформ, 1989. - Вып. 3. - С. 51-58.
10. Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Уртенев Д.С., Федоринов А.В. Оценка влияния кризисного течения закрученного потока на теплогидравлическую эффективность судовых ядерных энергетических установок // Тепловые процессы в технике, 2019г. Т. 11, Вып. 6 Стр. 242-249.
11. Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Ивлев О.А., Уртенев Д.С., Федоринов А.В. Исследование влияния вихревых потоков на элементы ЯЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2021г. Вып. 4 Стр. 72-81.
12. Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке. Открытие № 389. Гос. реестр открытий 18.10.1990 г.
13. Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение. - 1984.- С. 316-366.
14. Дрейцер Г.А. Эффективность использования закрутки потока для интенсификации теплообмена в трубчатых теплообменных аппаратах // Теплоэнергетика.- 1997.- № 11.- С. 61-65.
15. Webb R.L. Principles of Enhanced Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.- 556 с.
16. Andrews, M.J. and Fletcher, L.S. Comparison of Several Heat Transfer Enhancement Technologies for Gas Heat Exchangers // Journal of Heat Transfer, 1996. - V. 118. - pp. 897-902.

17. О. В. Митрофанова, О. А. Ивлев, А. В. Федоринов. О возможности применения сборок витых труб в парогенерирующих системах транспортных ядерных энергетических установок // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. №5-6. С. 238-244.
18. О.В. Митрофанова, И.Г. Поздеева. Исследование механизма саморегулирования акустических колебаний в импактном закрученном течении // Изв. РАН. МЖГ.- 2015.- № 5. С. 54-63.
19. Исследование гидродинамики и механизмов генерации акустических колебаний в сложных вихревых течениях / И.Г. Поздеева: дис. ... канд. тех. наук: 01.04.14. - Москва, 2019. - 117 с.

References

1. Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in the channels of nuclear power plants. M.: FIZMATLIT, 2010. - 288 p.
2. Mitrofanova O.V. Complex studies of the effects of generation of large-scale vortex formations in coolants of nuclear reactors Part I. Theoretical studies // Nuclear Physics and Engineering, 2010, vol. 1., no. 4, pp. 299-309.
3. O.V. Mitrofanova, I.G. Pozdeeva, A.B. Kruglov, V.B. Kruglov. Complex studies of the effects of generation of large-scale vortex formations in coolants of nuclear reactors. Part II. Experimental studies of impact swirling currents // Nuclear Physics and Engineering, 2012, volume 3, no. 2, pp. 112-119.
4. O.V. Mitrofanova, Yu. N. Tokarev. The influence of geometric factors on the formation of deterministic vortex structures in the collectors of reactors with liquid metal cooling // "Thermohydraulic aspects of the safety of nuclear power plants with fast neutron reactors". Collection of reports of the interdisciplinary thematic conference "Thermophysics-2005", November 16-18, 2005, Obninsk, SSC RF-IPPE; Obninsk: ONTI SSC RF-IPPE, 2006, 1.13, 9 p.
5. Hydrodynamics and safety of nuclear power plants / Collection of IPPE Proceedings in three volumes. Volume 2. Obninsk: SSC RF IPPE, 1999, 388 p.
6. Bezrukov Yu.A., Dragunov Yu.G., Logvinov S.A., Ulyanovsky V.N. Investigation of the mixing of coolant flows in the VVER vessel // Atomnaya Energiya. 2004. T. 96. Issue. 6. S. 432 - 440.
7. Patrashev A.N. Turbulent flows in fluid flows with large local vortex formations / In Sat. "Mechanics of turbulent flows", 1980. - S. 166-187.
8. Gusev B.D., Kalinin R.I., Blagoveshchensky A.Ya. Hydrodynamic aspects of the reliability of modern power plants. - L.: Energoatomizdat. Leningrad. Department. 1989. - 216 p.
9. G.F. Ipatov, A.S. Trofimov, V.Yu. Likhacheva, V.Ya. Kumaev, Yu.S. Yuriev. Influence of geometric and regime parameters of a cylindrical distributing manifold on the output non-uniformity of the coolant flow profile. Voprosy atomic nauki i tekhniki. Ser. Nuclear engineering and technology. -M.: TsNIAtominform, 1989. - Issue. 3. - S. 51-58.
10. Mitrofanova O.V., Ivlev O.A., Urtenov D.S., Fedorinov A.V. Evaluation of the impact of the crisis flow of a swirling flow on the thermal-hydraulic efficiency of shipboard nuclear power plants // Thermal processes in technology, 2019. T. 11, Issue. 6 Page 242-249.
11. Mitrofanova O.V., Bairamukov A.Sh., Ivlev O.A., Urtenov D.S., Fedorinov A.V. Investigation of the influence of vortex flows on the elements of nuclear power plants. Voprosy atomic nauki i tekhniki. Series: Nuclear Reactor Constants, 2021 Issue. 4 Page 72-81.
12. Novikov I.I., Skobelkin V.I., Abramovich G.N., Klyachko L.A. The regularity of fluid flow in a swirling flow. Opening number 389. State. register of discoveries 10/18/1990
13. Novikov I.I. Thermodynamics. M.: Mashinostroyeniye. - 1984.- S. 316-366.
14. Dreytser G.A. Efficiency of using flow swirl to intensify heat transfer in tubular heat exchangers // Teploenergetika.- 1997.- No. 11.- P. 61-65.
15. Webb R.L. Principles of Enhanced Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.- 556 p.
16. Andrews, M.J. and Fletcher, L.S. Comparison of Several Heat Transfer Enhancement Technologies for Gas Heat Exchangers // Journal of Heat Transfer, 1996. - V. 118. - pp. 897-902.
17. O. V. Mitrofanova, O. A. Ivlev, and A. V. Fedorinov. On the possibility of using assemblies of twisted pipes in steam generating systems of transport nuclear power plants. Teplovyie protsessy v tekhnike. 2018. V. 10. No. 5-6. pp. 238-244.
18. O.V. Mitrofanova, I.G. Pozdeeva. Investigation of the mechanism of self-regulation of acoustic oscillations in an impact swirling flow. Izv. RAN. MJG.- 2015.- No. 5. S. 54-63.
19. Study of hydrodynamics and mechanisms of generation of acoustic oscillations in complex vortex flows / I.G. Pozdeeva: dis. ... cand. those. Sciences: 01.04.14. - Moscow, 2019. - 117 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Митрофанова Ольга Викторовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплофизики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, НИЦ «Курчатовский институт», 123098, пл. Академика Курчатова, 1, e-mail: omitr@yandex.ru

Mitrofanova Olga Viktorovna, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Thermal Physics, National Research Nuclear University "MEPhI", 115409, Moscow, Kashirskoye Shosse, 31, Leading Researcher of the Kurchatov Complex for Nuclear Transport Energy Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", 123098, pl. Academician Kurchatov, 1, e-mail: omitr@yandex.ru

Ивлев Олег Александрович, ведущий инженер Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, НИЦ «Курчатовский институт», 123098, пл. Академика Курчатова, 1, e-mail: Ivlev_OA@nrcki.ru

Ivlev Oleg Alexandrovich, Leading Engineer of the Kurchatov Complex for Nuclear Transportation Energy Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", pl. Academician Kurchatov, 1, e-mail: Ivlev_OA@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 03.11.2023.

Научная статья

УДК 532.542: 621.039

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.012>

Влияние эффектов вихреобразования на работоспособность трубных систем парогенераторов судовых ядерных энергетических установок

Митрофанова О.В.^{1,2} omitr@yandex.ru, Ивлев О.А.¹ Ivlev_OA@nrcki.ru,Федоринов А.В.¹ andrejfedorinov@yandex.ru¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», ²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Аннотация. На основе анализа, проведенного с учетом данных, полученных в результате многолетнего опыта эксплуатации судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ), выявлен ряд факторов, влияющих на отказы в парогенерирующих системах. Целью проводимых исследований является разработка научно обоснованных рекомендаций для оптимизации конструктивных и компоновочных решений, обеспечивающих повышенный ресурс эксплуатации судовых ЯЭУ нового поколения. Проведены расчетно-теоретические исследования по моделированию процессов гидродинамики и теплообмена в каналах трубных систем парогенераторов змеевикового типа судовых ЯЭУ. Вычислительные эксперименты показали, что при сложной геометрии каналов теплогидравлического тракта, отличающихся трехмерной пространственной кривизной и переменностью проходного сечения, возникающая в определенных динамических режимах работы реакторной установки несанкционированная закрутка потока может приводить к эффекту ограничения расхода рабочего тела, обусловленному кризисом закрученного течения. Установлено, что явление кризиса закрученного потока сопровождается генерацией низкочастотных акустических колебаний и большими потерями давления, требующимися для формирования зоны рециркуляционного течения, препятствующего расходу текущих сред в сложных каналах ЯЭУ. Сравнение результатов проведенных расчетно-теоретических исследований с данными эксплуатации парогенераторов судовых ЯЭУ позволяют дать адекватное объяснение ряду причин снижения ресурсных показателей трубных систем паропроизводящих установок и предложить ряд рекомендаций для их устранения.

Ключевые слова: судовые ядерные энергетические установки, парогенератор, гидродинамика, теплообмен, моделирование, конструкция трубной системы, ресурс.

Благодарности: Бурцеву Олегу Веннаминовичу за обсуждение и поддержку направления исследований.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант РНФ № 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373/>

Для цитирования: Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Федоринов А.В. Влияние эффектов вихреобразования на работоспособность трубных систем парогенераторов судовых ядерных энергетических установок, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 95—102. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.012

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.012>

The effect of vortex formation on the operability of pipe systems of steam generators of marine nuclear power installations

Olga V. Mitrofanova^{1,2} omitr@yandex.ru, Oleg A. Ivlev¹ Ivlev_OA@nrcki.ru,Andrey V. Fedorinov¹ andrejfedorinov@yandex.ru¹National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation, ²National Research Center Kurchatov Institute, Russian Federation

Annotation. Based on the analysis carried out taking into account the data obtained as a result of many years of experience in the operation of shipboard nuclear power installations, a number of factors affecting failures in steam generating systems have been identified. The purpose of the research is to develop scientifically sound recommendations for optimizing design and layout solutions that provide an increased service life of new-generation marine nuclear power installations. Computational and theoretical studies have been carried out on modeling the processes of hydrodynamics and heat transfer in the channels of pipe systems of steam generators of marine nuclear power installations. Computational experiments have shown that with the complex geometry of the channels of the thermohydraulic tract, characterized by three-dimensional spatial curvature and the variability of the flow section, the unauthorized flow twist that occurs in certain dynamic modes of operation of the reactor plant can lead to the effect of limiting the of the working fluid flow rate due to the crisis of the swirl flow. It is established that the phenomenon of the swirl flow crisis is accompanied by the generation of low-frequency acoustic oscillations and large pressure losses required for the formation of a recirculation flow zone that prevents the of flow rate in complex channels of nuclear power installations. Comparison of the results of the conducted computational and theoretical studies with the data of the operation of steam generators of marine nuclear power installations allows us to give an adequate explanation for a number of reasons for the decline in the resource indicators of pipe systems of steam-producing installations and to offer a number of recommendations for their elimination.

Keywords: marine nuclear power installations, steam generator, hydrodynamics, heat transfer, modeling, pipe system design, operability.

Thanks to: Oleg Veniaminovich Burtsev for discussing and supporting the direction of research.

Funding: The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation: RNF grant No. 23-29-00373, <http://rscf.ru/project/23-29-00373/>

For citation: Olga V. Mitrofanova, Oleg A. Ivlev, Andrey V. Fedorinov The effect of vortex formation on the operability of pipe systems of steam generators of marine nuclear power installations, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 95—102. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.012

Введение

Проблема изучения гидродинамики и тепломассообмена турбулентных течений в каналах сложной геометрии остается актуальной для обеспечения надежной и безопасной работы ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Особенно эта проблема важна для оптимизации конструктивных и компоновочных решений при проектировании и создании нового поколения судовых реакторных установок (РУ) интегрального типа.

Источниками возбуждения колебаний в элементах теплогидравлического тракта судовых ЯЭУ могут являться циркуляционные насосы и нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе и рабочем теле, приводящие к генерации крупномасштабных вихреобразований и акустическим эффектам (в частности, таким, как акустическая кавитация и др.). В ЯЭУ с реакторной установкой интегрального типа её колебательные свойства как гидромеханической системы не сводятся к суперпозиции свойств образующих её элементов первого и второго контура (реактор, парогенератор, насосы, компенсатор давления (КД), трубопроводы и пр.), но приобретают новые, системные свойства [1]. Возможность возникновения виброакустических резонансов в самой моноблочной конструкции в этом случае связана с нелинейным наложением частотных спектров основных возмущений и их обертонов, обусловленных сложной гидродинамикой внутренних течений и внешнего обтекания трубных пучков парогенерирующих элементов, а также воздействием других внешних по отношению к моноблоку источников возмущений, в частности, центробежных насосов первого контура и трубной системы компенсации давления [2].

Анализ данных многолетних теплофизических измерений, снятых при мониторинге различных режимов работы судовых ЯЭУ показал, что в некоторых случаях фиксируются аномальные распределения полей давления и температуры в напорных коллекторах и активных зонах корпусных ядерных реакторов, а также в трубопроводных системах КД, что указывает на формирование крупномасштабных вихреобразований [3, 4]. В работе [5] было наглядно продемонстрировано существенное влияние геометрических и режимных параметров коллекторных систем на процесс генерации крупномасштабных вихрей, приводящих к неравномерности расхода теплоносителя в активных зонах реакторов, что. С помощью проведенных вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в работах [6, 7], удалось установить, что физические условия, способствующие генерации закрутки потока и возникновению локальных температурных аномалий в системах КД, связаны с наличием конструктивных

элементов, сочетающих в себе диффузорное расширение проходного сечения и изгибы каналов.

Результаты расчетно-теоретического моделирования

Объектами проводимых расчетно-теоретических исследований являются сложные гидромеханические системы, внутренние связи в которых обеспечиваются циркуляцией потоков теплоносителя и рабочих сред по сложным криволинейным каналам. В качестве примеров таких систем на рисунках 1, 2 представлены: схема паропроизводящей реакторной установки (РУ) интегрального типа Ритм-200 (рис. 1) и судовой парогенератор змеевикового типа ПГ-28 с компоновочной схемой трубного пучка.

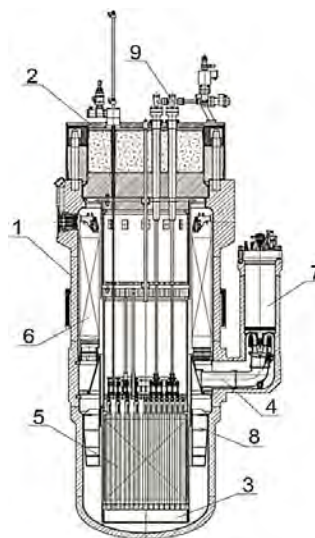


Рис. 1. Парогенерирующий блок реакторной установки интегрального типа Ритм -200:

- 1) – интегрированный корпус; 2) – крышка;
- 3) – шахта внутрикорпусная; 4) блок труб и устройств; 5) активная зона; 6) двенадцать касет парогенератора; 7) четыре ГЦН; 8) смеситель;
- 9) элементы системы управления и защиты (СУЗ)

Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена осуществлялось на основе применения теории термодинамической устойчивости и современных расчетных методов турбулентных течений. Решения поставленных задач получены с использованием уравнений движения, неразрывности и энергии при постановке соответствующих начальных и граничных условий. Расчеты проводились с помощью пакета ANSYS CFX и модели турбулентности k- ω -SST. Было установлено [8], что точность моделирования процессов движения жидкости в сложных криволинейных каналах с изменяющимся профилем проходного сечения при использовании модели турбулентности k- ω -SST выше по сравнению с другими RANS моделями турбулентности.

1.1. Явление кризиса закрученного потока

Выявление условий «аномального поведения» высокоскоростных потоков в элементах трубопроводных систем, имеющих сложную пространственную криволинейную геометрию, удалось получить на основе представлений о кризисе закрученного потока.

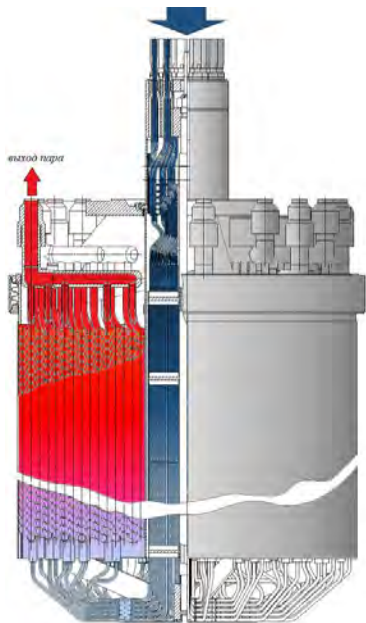


Рис. 2. Компоновочная схема парогенератора ПГ-28

Для теоретического описания кризиса закрученного потока, являющегося одним из ярких проявлений кризиса термодинамической устойчивости, связанного с переходом динамической системы к энергетически более выгодному состоянию, использовался подход, развитый академиком И.И. Новиковым в монографии [9] на основе ранее сделанного открытия [10]. Суть этого открытия заключается в определении кризиса закрученного течения как режима течения, при котором расходная скорость закрученного потока жидкости достигает своего предельного значения, равного скорости распространения длинных центробежных волн.

Возможность применения открытия И.И. Новикова к замкнутым циркуляционным трактам была обоснована в работе [11], где было показано, что условием достижения критической расходной скорости закрученного течения является условие равенства градиентов давления в продольном направлении и радиального перепада давления в поперечном сечении канала, возникающего за счет генерации крупномасштабного вихревого движения и закрутки потока.

Полученное ранее теоретическое описание кризиса закрученного потока позволило рассчитать характеристики движения и вихревую структуру потока в вычислительных экспериментах с соответствующей постановкой начальных и граничных условий.

1.2. Топологические особенности потока жидкости в условиях кризиса закрученного потока

К основным результатам проведенных численных экспериментов для различных элементов теплогидравлического тракта судовой ЯЭУ следует отнести выявление условий генерации

несанкционированной закрутки потока на сложных участках парогенерирующих трубопроводных систем второго контура и систем компенсации давления первого контура [12]. Было установлено, что при определенных условиях, связанных с изменением мощности РУ, реализуются условия кризиса закрученного потока, что приводит к возникновению зон локального реверсивного закрученного движения (гидродинамических пробок), перекрывающих проходные сечения каналов и приводящих к значительному увеличению гидравлического сопротивления. В работах [13, 14] проявление кризиса закрученного потока рассмотрено на примерах моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в трубопроводных системах компенсации давления и парогенератора паропроизводящей установки (ППУ) судовой ЯЭУ.

Виды вихревых пробок при реализации условий, приводящих к кризису закрученного потока в зонах диффузорного расширения проходного сечения каналов, представлены на рис. 3.

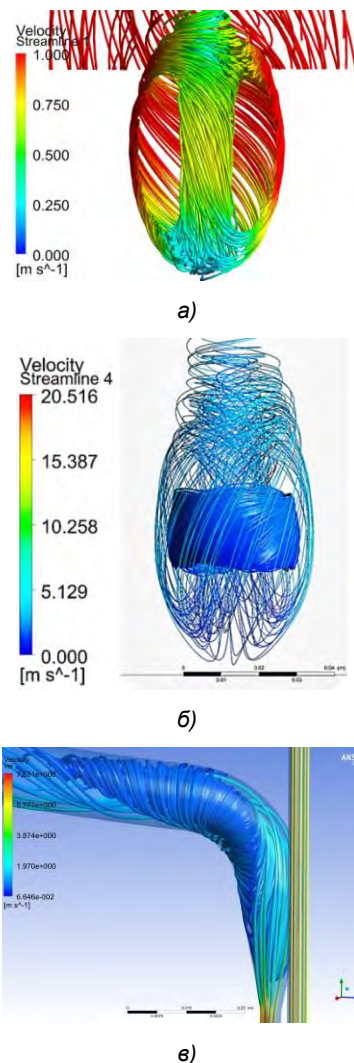


Рис. 3. Виды вихревых пробок при реализации условий, приводящих к кризису закрученного потока в зонах диффузорного расширения проходного сечения каналов: а), б) - в прямом цилиндрическом канале в кризисном (а) и закрученном (б) режимах; в) - в изогнутом канале за диффузорным расширением

Существование «закризисного» режима течения закрученного потока (рис.3б) возможно и на самом деле осуществляется на практике по той же причине, по которой можно обеспечить сверхзвуковое течение газа в специальном сопле – сопле Лавала. Здесь роль управления изменением проходного сечения канала в отличие от жесткой геометрии канала в сопле Лавала (переход от сужения к расширению канала) играет сама «пробка». Это явление было продемонстрировано в монографии [11] на предложенной модели трансформации вихря.

2. Анализ эксплуатации трубных систем судовых парогенераторов

На первых трёх атомных ледоколах «Ленин», «Сибирь», «Арктика» трубные системы парогенераторов ПГ-18т змеевикового типа в составе РУ типа ОК-900 отработали без замены 150 тысяч часов. За весь период эксплуатации произошло всего 5 отказов, что составляло 1,1% от общего количества секций парогенераторов на трех ледоколах. На основании положительных результатов эксплуатации ресурс был продлен с 30 тыс. до 90 тыс. часов. Вместе с тем, трубная система ПГ-18т имела конструктивные недостатки, которые сохранились и в современной конструкции ПГ-28. К ним следует отнести следующее.

Парогенераторы не обеспечивают энергетический режим работы реакторной установки на естественной циркуляции теплоносителя. В диапазоне тепловой мощности от 0 до 10% $N_{ном}$ устойчивая работа парогенераторов не может быть осуществлена. На энергетических уровнях мощности РУ свыше 10% $N_{ном}$ в трубной системе парогенератора наблюдается нелинейный рост гидравлического сопротивления

Основным негативным явлением для парогенераторов является эффект снижения теплогидравлической эффективности, заключающийся в падении температуры перегретого пара (рис. 4) с одновременным ростом гидравлических потерь (рис. 5).

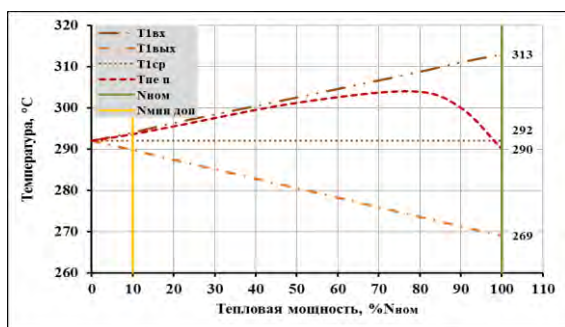


Рис. 4. Изменение температур перегретого пара и теплоносителя в зависимости от тепловой мощности РУ

Рисунок 4 показывает, что на уровнях мощности РУ свыше 75% $N_{ном}$ наблюдается отклонение температуры перегретого пара от температуры теплоносителя на выходе из реактора, что говорит о резком снижении тепловой эффективности работы реакторной установки (РУ).

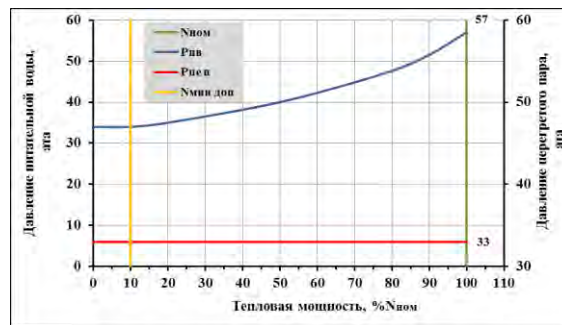


Рис.5. Изменение давления нагнетания питательного насоса в зависимости от тепловой мощности РУ

Кривая зависимости давления нагнетания питательного насоса, представленная на рисунке 5, соответствует характеру увеличения гидравлического сопротивления в трубной системе ПГ при увеличении мощности РУ.

Кривая зависимости давления нагнетания питательного насоса, представленная на рисунке 5, соответствует нелинейному характеру увеличения гидравлического сопротивления в трубной системе ПГ при увеличении мощности РУ.

В трубных системах парогенераторов змеевикового типа (см. рис.2) дроссельные трубы отделены от змеевиковых цилиндрическим термоизолирующим экраном с целью исключения возможности в них парообразования. Таким образом, поверхность труб дроссельного пакета опускного питательного коллектора не участвует в процессе теплопередачи. Для выравнивания давления по 1 контуру межтрубное пространство дроссельного пакета соединено с основным циркуляционным трактом. Такое конструкторское решение привело к образованию застойной зоны теплоносителя в межтрубном пространстве труб дроссельных пакетов. Согласно исследованиям, описанным в работе [14], можно утверждать, что во время работы циркуляционных насосов первого контура в этой зоне могут возникать стоячие волны.

При проектировании ПГ-28 была выполнена доработка трубной системы парогенератора ПГ-18т, в результате которой были внесены изменения в дроссельный пакет с целью разделения внутреннего устройства на секции по питательной воде: 100 питательных трубок разделили на 20 секций по 5 трубок в каждой. Однако внедрение такого конструкторского решения было ошибочным, так как прочность дроссельного пакета была значительно снижена.

Результатом этого просчета стало возникновение отказов трубных систем на а/л «Вайгач», «Россия», «Таймыр». На рисунках 6, 7 представлены зоны локальных повреждений трубных систем ПГ-28 и фотографии мест изломов коллекторных питательных труб на атомных ледоколах «Вайгач», «Россия», «Таймыр». Статистика отказов показывает, что большинство изломов по полному сечению коллекторной трубы происходит в месте ниже резьбопаянного соединения, как выделено на рисунке 6. Также при эксплуатации ПАТЭС «Академик Ломоносов» отмечены неоднократные случаи отрыва дросселей (также показано на рис.6).

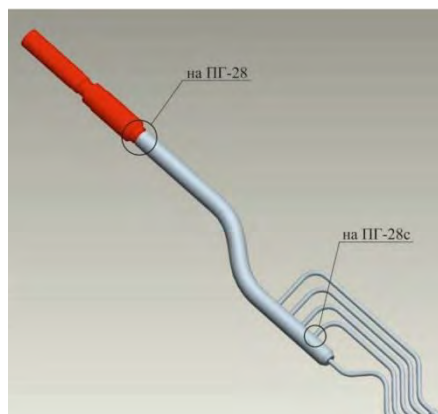


Рис. 6. Дроссельный пакет ПГ-28 с выделенными зонами отрыва труб



а)



б)



в)

Рис. 7. Зоны отрыва коллекторных питательных труб ПГ-28 на атомных ледоколах а) «Вайгач», б) «Россия», в) «Таймыр»

В 90-х годах и начале 2000-х годов изменилась модель эксплуатации атомных ледоколов и лихтеровоза «Севморпуть». Вместе с этим начались массовые отказы трубных систем на а/л «Севморпуть», «Таймыр», «Вайгач», «Ямал», «50-лет ПОБЕДЫ». На момент вывода из эксплуатации на а/л Советский Союз, «Россия» было заглушено 25% от общего количества секций ПГ-28

Под воздействием гамма-излучения происходит процесс ионизации теплоносителя, что

сопровождается активным выделением водорода, который накапливается в верхней части межтрубного пространства дроссельного пакета в застойной зоне. Это способствует «наводороживанию» титанового сплава, из которого изготовлены трубы внутреннего устройства. За счет потери пластичности материала труб происходит его охрупчивание, как в энергетических режимах, так и при периодическом расхолаживании РУ, а также в режиме длительного хранения. На рисунке 8 представлена фотография места разрушения коллекторной питательной трубы парогенератора атомного ледокола «Таймыр».



Рис. 8. Место разрушения в зоне наводороживания коллекторной питательной трубы ПГ а/л «Таймыр»

Аналогичные отказы трубных систем парогенераторов происходили на атомных ледоколах «50 лет ПОБЕДЫ» и лихтеровозе «Севморпуть».

3. Способы совершенствования трубной системы

Проведенные целенаправленные расчетно-теоретические исследования, краткое описание которых приведено выше, позволили установить основные факторы, приводящие к возникновению перечисленных отказов. К этим факторам следует отнести, прежде всего, сложную геометрию рассматриваемых трубных систем, создающую зоны реверсивного закрученного течения, что может приводить к кризису закрученного потока при создании определенных условий.

Образование крупномасштабной вихревой структуры потока приводит к генерации низкочастотных акустических колебаний. Совпадение собственных частот колебаний рассматриваемых систем (акустических стоячих волн) с частотами акустических колебаний, генерируемых вихревыми структурами, может приводить к усилению вибраций и вибро-резонансным эффектам.

Основываясь на результатах анализа и проведенных расчетно-теоретических исследованиях, для совершенствования конструкции, повышения эффективности и работоспособности судовых ЯЭУ могут быть предложены следующие рекомендации.

Чтобы исключить вероятность возникновения зон реверсивного движения (гидравлических пробок) с пониженным давлением в центре потока рабочей среды, избежать локального подкипания недогретой жидкости в парогенерирующих каналах и генерации низкочастотных акустических колебаний, а также возникновения кризиса закрученного потока, резонансных явлений и разрушений в трубных системах ПГ и компенсации давления необходимо внести определенные

конструкционные изменения на основе решения оптимизационных задач. В частности, необходимо оптимизировать геометрию участков теплогидравлического тракта, имеющих каналы, сочетающие в себе пространственную кривизну и переменную площадь проходного сечения.

Для уменьшения напряжений в дроссельном пакете трубной системы необходимо оптимизировать соотношение толщины стенок к среднему диаметру труб. При этом деление трубной системы на секции по пару и воде лучше производить порядно, для чего дроссели устанавливать на входе в коллекторные питательные трубы, относящиеся к одному и тому же ряду.

Для снижения гидравлического сопротивления во 2 контуре более предпочтительна разводка дроссельных труб при соединении со змеевиковыми в горизонтальной плоскости по сравнению с вертикальной, которая принята в ПГ-28. В этом случае может быть понижен уровень тепловой мощности для получения заданных параметров перегретого пара или температурный подогрев теплоносителя в активной зоне, а также снижена средняя температура теплоносителя.

Поверхность теплообмена при неизменных существующих габаритных размерах трубной системы и корпуса ПГ может быть увеличена за счет прокачки теплоносителя в межтрубном пространстве дроссельного пакета опускного питательного коллектора. Прокачка теплоносителя в межтрубном пространстве опускного питательного коллектора и дроссельных труб обеспечит наиболее благоприятный температурный режим для питательных и дроссельных труб опускного коллектора, а также дополнительный подогрев питательной воды до температуры, близкой к температуре насыщения, что повысит термический КПД установки.

Организация циркуляции теплоносителя с дополнительным обогревом на экономайзерном участке приведет к устранению застойной зоны в межтрубном пространстве дроссельного пакета. Это уменьшит накопление газов в верхней части опускного питательного коллектора, в том числе водорода, что понизит вероятность протекания процесса «наводороживания» титанового сплава, из которого изготовлены трубы внутреннего устройства.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что в сложных каналах парогенераторов вихревая структура течения рабочего тела существенно зависит от геометрии трубопроводов и последовательности изгибов различной ориентации, приводящих в ряде случаев к генерации закрутки потока в масштабе всего поперечного сечения каналов.

Определены условия возникновения «кризиса» закрученного потока, связанного с образованием области реверсивного спирально-винтового течения.

Показано, что наличие зоны рециркуляционного крупномасштабного вихревого течения, обусловленного геометрией канала, сочетающего в себе переменность проходного сечения с пространственной кривизной, может приводить к генерации низкочастотных акустических колебаний, локальному вскипанию в области образования гидродинамических пробок и опасности возникновения резонансных эффектов.

На основании выполненных исследований выработаны рекомендации по повышению безопасности и надежности судовых ЯЭУ.

Литература

1. Митенков Ф.М. Судовая ядерная энергетика. // Вестник РАН. – 2003.- Т.73. - № 6. – С. 488-495.
2. Г.В. Аркадов, В.И. Повелко, А.И. Усанов. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Энергоатомиздат, М. 2004.
3. Патрашев А.Н. Турбулентные течения в потоках жидкости с крупными локальными вихреобразованиями / В сб. «Механика турбулентных потоков», 1980. – С. 166-187.
4. Гусев Б.Д., Калинин Р.И., Благовещенский А.Я. Гидродинамические аспекты надёжности современных энергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние. 1989. – 216 с.
5. О.В. Митрофанова, Ю. Н. Токарев. Влияние геометрических факторов на формирование детерминированных вихревых структур в коллекторах реакторов с жидкометаллическим охлаждением // «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах». Сборник докладов межотраслевой тематической конференции «Теплофизика-2005», 16-18 ноября 2005 г., г. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ; Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 2006, 1.13, 9 с.
6. О.В. Митрофанова, А.Ш. Байрамуков Моделирование процессов гидродинамики в каналах трубной системы компенсации давления судовой ядерной энергетической установки // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. М.:Шанс, 2019. С. 47-50.
7. O V Mitrofanova, A S Bayramukov, O A Ivlev, D S Urtenov, A V Fedorinov Modeling of Thermal-Hydraulic Processes in the Marine Power Installation Elements // Journal of Physics: Conference series, 2020 Vol. 1683, No. 2, 022078, DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022078>
8. О.В. Митрофанова, А.Ш. Байрамуков. Расчетное моделирование движения теплоносителя в сложных криволинейных каналах. Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. №5. С. 194–202.
9. Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение. – 1984.- С. 316-366.
10. Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке. Открытие № 389 внесено в Гос. реестр открытий 18.10.1990 г.
11. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 288 с.
12. О.В. Митрофанова, О.А. Ивлева, Д.С. Уртенков, А.В. Федоринов. Оценка влияния кризисного течения закрученного потока на теплогидравлическую эффективность судовых ядерных энергетических установок. Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. №6. С. 242–249. РИНЦ.

13. Olga V. Mitrofanova Vortex Structurization of Swirl Flows in Energy Systems Heat Transfer Engineering, 44(6):1-12, September 2022, DOI:10.1080/01457632.2022.2127048
14. Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Ивлев О.А., Уртенев Д.С., Федоринов А.В. Исследование влияния вихревых потоков на элементы ЯЭУ. Вопросы атомной науки и техники, серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2021, с. 72-79.

References

1. Mitenkov F.M. Ship nuclear power.// Bulletin of the Russian Academy of Sciences. - 2003.- Т.73. - No. 6. - S. 488-495.
2. G.V. Arkadov, V.I. Povelko, A.I. Usanov. Vibronoise diagnostics of VVER. Energoatomizdat, M. 2004.
3. Patrashev A.N. Turbulent flows in fluid flows with large local vortex formations / In Sat. "Mechanics of turbulent flows", 1980. - S. 166-187.
4. Gusev B.D., Kalinin R.I., Blagoveshchensky A.Ya. Hydrodynamic aspects of the reliability of modern power plants. - L.: Energoatomizdat. Leningrad. Department. 1989. - 216 p.
5. O.V. Mitrofanova, Yu. N. Tokarev. The influence of geometric factors on the formation of deterministic vortex structures in the collectors of reactors with liquid metal cooling // "Thermohydraulic aspects of the safety of nuclear power plants with fast neutron reactors". Collection of reports of the interdisciplinary thematic conference "Thermophysics-2005", November 16-18, 2005, Obninsk, SSC RF-IPPE; Obninsk: ONTI SSC RF-IPPE, 2006, 1.13, 9 p.
6. O.V. Mitrofanova, A.Sh. Bayramukov Modeling of hydrodynamic processes in the channels of the pipe pressure compensation system of a marine nuclear power plant. RAS A.I. Leontiev. M.: Chance, 2019. S. 47-50.
7. O V Mitrofanova, A S Bayramukov, O A Ivlev, D S Urtenov, A V Fedorinov Modeling of Thermal-Hydraulic Processes in the Marine Power Installation Elements // Journal of Physics: Conference series, 2020 Vol. 1683, no. 2, 022078, DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022078>
8. O.V. Mitrofanova, A.Sh. Bayramukov. Computational modeling of coolant motion in complex curvilinear channels. Thermal processes in technology. 2019. Vol. 11. No. 5. pp. 194–202.
9. Novikov I.I. Thermodynamics. M.: Mashinostroenie. – 1984.- S. 316-366.
10. Novikov I.I., Skobelkin V.I., Abramovich G.N., Klyachko L.A. The regularity of fluid flow in a swirling flow. Discovery No. 389 is included in the State. register of discoveries 10/18/1990
11. Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in the channels of nuclear power plants. M.: FIZMATLIT, 2010. - 288 p.
12. O.V. Mitrofanova, O.A. Ivlev, D.S. Urtenov, A.V. FEDORINOV. Evaluation of the influence of the crisis flow of a swirling flow on the thermal-hydraulic efficiency of ship nuclear power plants. Thermal processes in technology. 2019. Vol. 11. No. 6. pp. 242–249. RSCI.
13. Olga V. Mitrofanova Vortex Structurization of Swirl Flows in Energy Systems Heat Transfer Engineering, 44(6):1-12, September 2022, DOI:10.1080/01457632.2022.2127048
14. Mitrofanova O.V., Bairamukov A.Sh., Ivlev O.A., Urtenov D.S., Fedorinov A.V. Study of the influence of vortex flows on the elements of nuclear power plants. Questions of atomic science and technology, series: nuclear reactor constants, issue 4, 2021, p. 72-79.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Митрофанова Ольга Викторовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплофизика, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, НИЦ «Курчатовский институт», 123098, пл. Академика Курчатова, 1, e-mail: omitr@yandex.ru

Mitrofanova Olga Viktorovna, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Thermal Physics, National Research Nuclear University "MEPhI", 115409, Moscow, Kashirskoye Shosse, 31, Leading Researcher of the Kurchatov Complex for Nuclear Transport Energy Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", 123098, pl. Academician Kurchatov, 1, e-mail: omitr@yandex.ru

Ивлев Олег Александрович, ведущий инженер Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, НИЦ «Курчатовский институт», 123098, пл. Академика Курчатова, 1, e-mail: Ivlev_OA@nrcki.ru

Федоринов Андрей Витальевич, аспирант, инженер Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, НИЦ «Курчатовский институт», 123098, пл. Академика Курчатова, 1, e-mail: andrefedorinov@yandex.ru

Ivlev Oleg Alexandrovich, Leading Engineer of the Kurchatov Complex for Nuclear Transportation Energy Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", pl. Academician Kurchatov, 1, e-mail: Ivlev_OA@nrcki.ru

Fedorinov Andrey Vitalievich, graduate student, engineer of the Kurchatov complex of nuclear transport energy technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", 123098, pl. Academician Kurchatov, 1, e-mail: andrefedorinov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 03.11.2023.

Научная статья

УДК 621.436:621.57

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.013>

Перспективы утилизации теплоты уходящих газов на судах рыбопромыслового флота

Чехранов С.В.¹ turboroom@yandex.ru, Симашов Р.Р.¹ forsimashov@yandex.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Рассматриваются проблемы энергосбережения с точки зрения утилизации вторичных энергоресурсов на судах рыбопромыслового флота. Анализируется наиболее энергоемкая составляющая вторичных энергоресурсов - теплота уходящих газов судовых двигателей внутреннего сгорания. Приводятся широко известные примеры использования этого энергоресурса в различных схемах утилизации и обосновывается необходимость совершенствования современного подхода к проблеме утилизации как таковой. Прежде всего обращается внимание на то, что для судов рыбопромыслового флота в утилизационных схемах выгодно применять тригенерационные технологии, поскольку холод является для них необходимым и очень важным производственным ресурсом. Кроме того, замена части штатных холодильных машин утилизационными холодильными установками позволяет обеспечить гарантированную окупаемость системы утилизации. С целью обоснования эффективности данного направления утилизации теплоты уходящих газов двигателей внутреннего сгорания проанализированы режимы работы добывающих и рыбообрабатывающих судов, а также нагрузки их двигателей за все время рейса.

Ключевые слова: энергосбережение, утилизация, вторичные энергоресурсы, тригенерация, рыбопромысловый флот, холодильная установка

Для цитирования: Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Перспективы утилизации теплоты уходящих газов на судах рыбопромыслового флота. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 103—109. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.013

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.013>

Prospects for the recycling of the heat of exhaust gases on ships of the fishing fleet

Sergei V. Chekhranov¹ turboroom@yandex.ru, Rafail R. Simashov¹ forsimashov@yandex.ru¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The problems of energy saving from the point of view of recycling of secondary energy resources on the vessels of the fishing fleet are considered. The most energy-intensive component of secondary energy resources is analyzed - the heat of exhaust gases of marine internal combustion engines. Widely known examples of the use of this energy resource in various recycling schemes are given and the need to improve the modern approach to the problem of recycling as such is substantiated. First of all, attention is drawn to the fact that it is beneficial to use trigeneration technologies in the recycling schemes for fishing vessels, since cold is a necessary and very important production resource for them. In addition, the replacement of part of the standard refrigeration machines with recycling refrigeration units ensures a guaranteed payback of the recycling system. In order to substantiate the effectiveness of this direction of recycling of the heat of exhaust gases of internal combustion engines, the operating modes of fishing and fish processing vessels, as well as the load of their engines for the entire duration of the voyage, are analyzed.

Key words: energy saving, recycling, secondary energy resources, trigeneration, fishing fleet, refrigeration machine

For citation: Sergei V. Chekhranov, Rafail R. Simashov Prospects for the recycling of the heat of exhaust gases on ships of the fishing fleet. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 103—109. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.013

Введение

Вопросы энергосбережения стоят в ряду важнейших проблем развития современной энергетики, как для стационарных, так и для транспортных энергетических установок. Причем, в последние годы приоритеты сместились из области экономии топлива в область экологии. При этом, разумеется, что вопросы окупаемости энергосберегающих мероприятий никуда не исчезают, поскольку устанавливать оборудование, приносящее убытки, нет смысла.

Одним из важнейших направлений на пути энергосбережения была и остаётся утилизация

вторичных энергоресурсов. В судовой энергетике вопросам утилизации уделяется очень большое внимание. Если учесть, что на флоте главными, и во многих случаях, единственными источниками механической и электрической энергии являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС), то именно они являются и основными источниками вторичных энергоресурсов. Из них к наиболее значимым и энергоёмким можно отнести теплоту уходящих газов из цилиндров двигателей. Утилизацией этого энергоресурса создатели ДВС занимаются, практически, с момента появления этого типа двигателей.

В первую очередь тепло уходящих газов утилизируется в наддувочном турбокомпрессоре, после которого температура газов остаётся ещё достаточно высокой. Поэтому, вторым звеном утилизационной схемы, как правило, является утилизационный паровой котел (УПК). К этому можно добавить, что ещё одним элементом в схеме утилизации уходящих газов может быть компаундная газовая турбина, работающая через редукторную передачу на коленчатый вал двигателя. Утилизационные схемы с перечисленными элементами широко описаны в научной и технической литературе [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. И если в утилизационной схеме присутствуют все отмеченные элементы, то такую схему принято называть схемой глубокой утилизации.

Однако на практике единственным безоговорочным элементом утилизационных схем является наддувочный турбокомпрессор. Что касается УПК, то они также присутствуют на различных судах промыслового и транспортного флота, но достаточно полно востребованы такие котлы преимущественно на рыбообработывающих судах промыслового флота и танкерах, перевозящих мазут в числе судов транспортного флота. Во всех других случаях УПК используются редко. А применение утилизационных компаундных газовых турбин пока является редкостью из-за их достаточно высокой стоимости.

Недостаточное использование УПК прежде всего связано с тем, что потребности большинства судов в паре и горячей воде незначительны. Но здесь следует отметить, что одним из элементов утилизационной схемы может быть утилизационный паровой турбогенератор (УТГ). Именно этот элемент входит в состав схем глубокой утилизации. Иначе говоря, увеличение температуры пара за счет установки пароперегревателя в УПК позволяет повысить востребованность в утилизационных паровых схемах. Но если учесть, что УПК может обеспечить требуемую паропроизводительность только на нагрузках двигателя близких к номинальным, то становится очевидным, что такие схемы утилизации будут достаточно эффективными только для судов, работающих большую часть эксплуатационного времени на номинальных режимах нагрузки.

Здесь следует отметить, что энергетические установки недавно построенных и проектируемых судов в своём большинстве содержат валогенераторы, которые на ходовых режимах практически полностью заменяют собой вспомогательные дизель-генераторы. И таким образом, необходимость в УТГ фактически отпадает. В этой связи можно отметить интересное предложение [9] об использовании паровой турбины в качестве компаундной, работающей на коленчатый вал двигателя. Это позволяет раздвинуть границы применения паровых турбин в судовых утилизационных схемах. В целом, все описанные проблемы относятся к когенерационным установкам, где вырабатываются два вида энергии – механическая и тепловая.

Те же выводы можно отнести и к тригенерационным технологиям в схемах утилизации, где вырабатывается третья составляющая – холодовая энергия [10]. Следует

отметить, что во всех этих источниках холод рекомендуется использовать для охлаждения воздуха на входе в наддувочный турбокомпрессор. Такой подход к утилизации обеспечивает двигателю сохранение паспортного значения коэффициента избытка воздуха и, как утверждают авторы, снижение теплонапряженности деталей цилиндрико-поршневой группы.

1. Расходная составляющая топлива на судах

Оценка возможности и необходимости применения на судах тех, или иных схем утилизации в конечном итоге сводится к вопросам окупаемости затрат на реализацию этих схем. В таких оценках сравниваются стоимость сэкономленного топлива и затраты на приобретение, установку и эксплуатацию утилизационного оборудования. И чем дешевле топливо, тем длительней срок окупаемости утилизационных мероприятий. Конечно, смещение акцентов область экологии снижает остроту вопросов окупаемости, но не избавляет от них.

Согласно [10] статьи расхода топлива на судах рыбопромыслового флота европейского бассейна в условно усредненном виде распределяются так, как показано в таблицах 1,3. Здесь видно, что топливо главным образом тратится на главный двигатель и холодильную установку, которая работает от судовой электростанции. Это говорит о том, что УПК может с максимальной эффективностью использоваться в утилизационных схемах. А для промысловых и обрабатывающих судов расход топлива делится примерно поровну между главным двигателем и вспомогательной котельной установкой.

Таблица 1

Статьи расходования топлива		Доля топлива % для типов судов		
		Транс- портный рефри- жератор	Рыбопера- батывающее судно	Рыбопро- мысловое судно
В целом за рейс	ход судна	70	50	40
	холодильная установка	20	10	25
	котельная установка	7	33	28
	остальные потребители	3	7	7

Таблица 2

Статьи расходования топлива	Доля топлива % для типов судов		
	Транспортный рефрижератор	Рыбоперерабатывающее судно	Рыбопромысловое судно
Ход на	ход судна	90	70
	холодильная установка	4	6
	котельная установка	2	20
	остальные потребители	4	4

Таблица 3

Статьи расходования топлива		Доля топлива % для типов судов		
		Транс- портный рефри- жератор	Рыбопера- батывающее судно	Рыбопро- мысловое судно
На промысле	ход судна	-	42	37
	холодильная установка	-	10	26
	котельная установка	-	40	35
	остальные потребители	-	8	2

В этой связи следует отметить, что использование тригенерации в утилизационных системах существенно меняет подход к вопросам окупаемости. Прежде всего, это относится к судам рыбопромыслового флота. Дело в том, что холодильные установки, входящие в состав тригенерационных схем утилизации, способны заменить часть штатных холодильных машин. И в этом случае стоимость оборудования утилизационных систем компенсируется стоимостью заменяемых холодильных машин, работа которых обеспечивается судовой электростанцией.

2. Анализ нагрузок судов Дальневосточного бассейна

Как уже отмечалось, выбор конструктивных схем для утилизации теплоты уходящих газов судового ДВС существенно зависит от режима работы судна и нагрузок двигателя в течение всего рейса.

Таблица 4

Осредненные значения относительной продолжительности отдельных режимов работы основных типов добывающих судов.

Режимы работы судов	Относительная продолжительность режимов работы %		
	СРТР	РТМ	БАТМ
Работа в море	100	100	100
в том числе переходы на промысел и обратно в порт	18	18.1	19.3
Промысловое время	82	81.9	80.7
В том числе			
работа с орудиями лова	67.2	62.3	60
переходы в районы промысла	8.9	6.9	8.3
стоянки у плавучих баз	2.4	8.9	10.5
ожидание рефрижераторов и танкеров	0.5	3.1	1.9
потери промыслового времени из-за штормовой погоды	3	0.7	0

Проще всего по таким критериям оценивать транспортные суда, поскольку они, практически, в течение всего рейса работают на нагрузках, близким к номинальным. Для таких судов утилизация теплоты уходящих газов ДВС дает наибольший эффект и выбор утилизационных схем не представляет больших сложностей. Гораздо сложнее выбирать схемы утилизации для добывающих и рыбообрабатывающих судов рыбопромыслового флота.

В рамках такой оценки был выполнен анализ работы промысловых судов Дальневосточного бассейна. Среди добывающих судов выделим суда типа СРТР, РТМ и БАТМ как наиболее используемые. Среди рыбообрабатывающих судов проанализируем универсальные плавбазы, тунцеловные базы, консервные заводы и рефрижераторы. Результаты анализа усредненных показателей для указанного типа судов представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 5

Режимы работы рыбообрабатывающих судов

Режимы работы судов	Относительная продолжительность режимов работы %				
	Универсаль- ные плав- базы	Тунце- ловны е базы	Консер- вные заводы	Рефрижера- торы	
				Произ- водст- венны е	Транс- порт- ные
Работа в море	100	100	100	100	100
в том числе переходы на промысел и обратно в порт	29.1	26.7	10	22.5	63.4
Промысел	70.9	74.3	90	77.5	36.6
В том числе					
обработка судов	58.1	48.6	77	61.1	33.8
ожидание промысловых	5.2	3.6	—	2.3	2.5
работа с транспортным и судами	3.2	—	0.6	5.6	—
переходы по району	4.4	22.1		8	—
потери времени из-за штормовой погоды	—	—	12.2	0.5	0.3

Как видно из анализа, у добывающих судов основное время рейса уходит на промысел и переходы в порт и обратно. При этом характер распределения нагрузки главных двигателей подтверждает целесообразность широкого применения технологий утилизации теплоты

уходящих газов ДВС. Для примера приведем данные по наиболее характерным добывающим судам: РТМ "Тропик", РТМ "Атлантик", БМРТ "Маяковский", БМРТ "Рембрандт, БМРТ "Прометей".

Нагрузки главных дизелей добывающих судов, (рис. 1, 2) как на ходовых, так и на промысловых режимах позволяют практически постоянно использовать энергию уходящих газов в утилизационных паровых котлах (УПК).

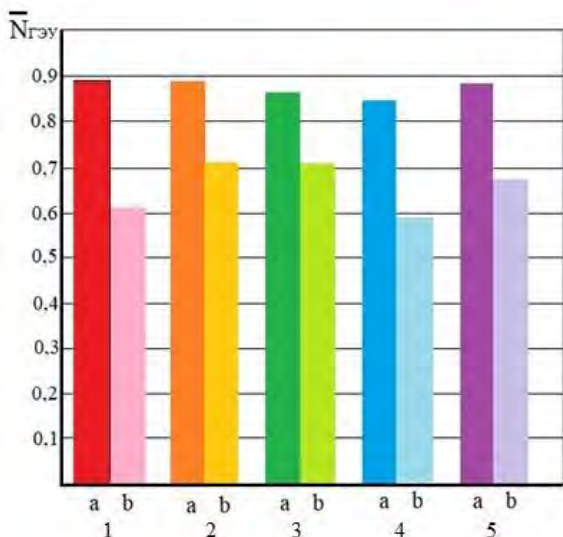


Рис. 1. Режимы нагрузок главных дизелей добывающих судов

1 – "Тропик", 2 – "Атлантик", 3 – "Маяковский", 4 – "Рембрандт, 5 – "Прометей"
значение на ходовых режимах, b – на промысловых

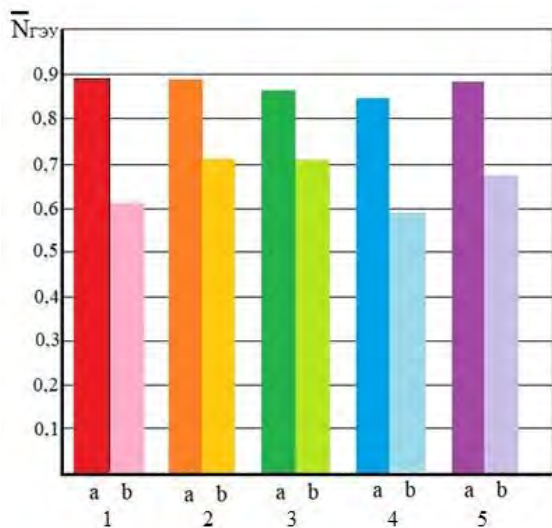


Рис. 2. Режимы нагрузок главных дизелей у рыбообрабатывающих и приемно-транспортных судов

1 – плавбаза "Рыбацкая Слава", 2 – плавбаза "Андрей Захаров", 3 – производственный рефрижератор "Таврия", 4 – транспортный рефрижератор "Остров Русский", 5 – ТР "Камчатские горы"
a – значение на ходовых режимах, b – на промысловых

Пар для производственных нужд судна в значительных объемах востребован только там, где есть рыбомучная установка. В других случаях пара требуется значительно меньше и невостребованный

пар целесообразно направлять в утилизационную паровую турбину (УПТ). При этом, как уже отмечалось, УПТ можно использовать для как для привода электрогенератора, так и как компаундную турбину, работающую через редуктор на коленчатый вал двигателя [9]. В схемах, разработанных Дальрыбвтузом [11], предлагается использовать УПТ для привода холодильного компрессора, например, центробежного, или винтового с целью частичного замещения штатных холодильных машин судна. Окупаемость такой схемы более убедительна, чем в топливном варианте.

Анализ нагрузок главных дизелей у рыбообрабатывающих и приемно-транспортных судов показал, что главный двигатель у них полностью загружен только на ходовых режимах. Но если учесть, что на плавбазах во время промысла на полную нагрузку работают судовые электростанции, у которых суммарная мощность вспомогательных дизелей сопоставима с мощностью главного двигателя, то нагрузка УПК останется практически полной на всех режимах работы судна. А это значит, что с экономической точки зрения вполне оправдано применение технологий утилизации теплоты уходящих газов для большинства типов рыбопромысловых судов.

3. Утилизация теплоты уходящих газов

Следует отметить, что в схемах утилизации низкопотенциальной теплоты используются низкиопящие рабочие тела (хладоны), широко применяющиеся в холодильной технике. Как правило, такие схемы утилизации основаны на использовании паротурбинного цикла Ренкина с утилизационным турбокомпрессором (УТК).

В составе тригенерационной схемы утилизации хладоновая турбина может приводить холодильный компрессор и таким образом, как и в ранее сформулированном предложении, заменить часть штатных холодильных машин. Причем, в такой схеме утилизации может быть использована как теплота охлаждающей воды дизелей, так и теплота уходящих газов ДВС. В этой связи стоит отметить предложение о выносе экономайзера УПК в машинное отделение с целью нагрева питательной воды теплом сжатого воздуха от наддувочного турбокомпрессора, а на его место установить нагреватель хладона. Для исключения возможного возгорания воспламеняющихся хладонов теплоту от источников вторичных энергоресурсов предпочтительно передавать через безопасные промежуточные теплоносители. На рис. представлена одна из таких схем, предлагаемая для БАТМ.

Есть еще одно перспективное направление для применения тригенерации в утилизационных схемах, связанное с заменой штатных холодильных машин. Это применение турбодетандерных технологий с воздушными холодильными машинами. В таких схемах утилизации наиболее реализуема схема с двумя центробежными компрессорами. Один из них (компрессор низкого давления) приводится во вращение паровой турбиной от УПК, а другой (компрессор высокого давления), фактически являющийся второй ступенью сжатия, приводится воздушным турбодетандером. Поскольку в турбодетандере расширяется воздух, сжатый до достаточно высокого давления двумя

компрессорами, то на выходе можно получить существенно отрицательные температуры,

достаточные для охлаждения рыбопродукции в трюмах.

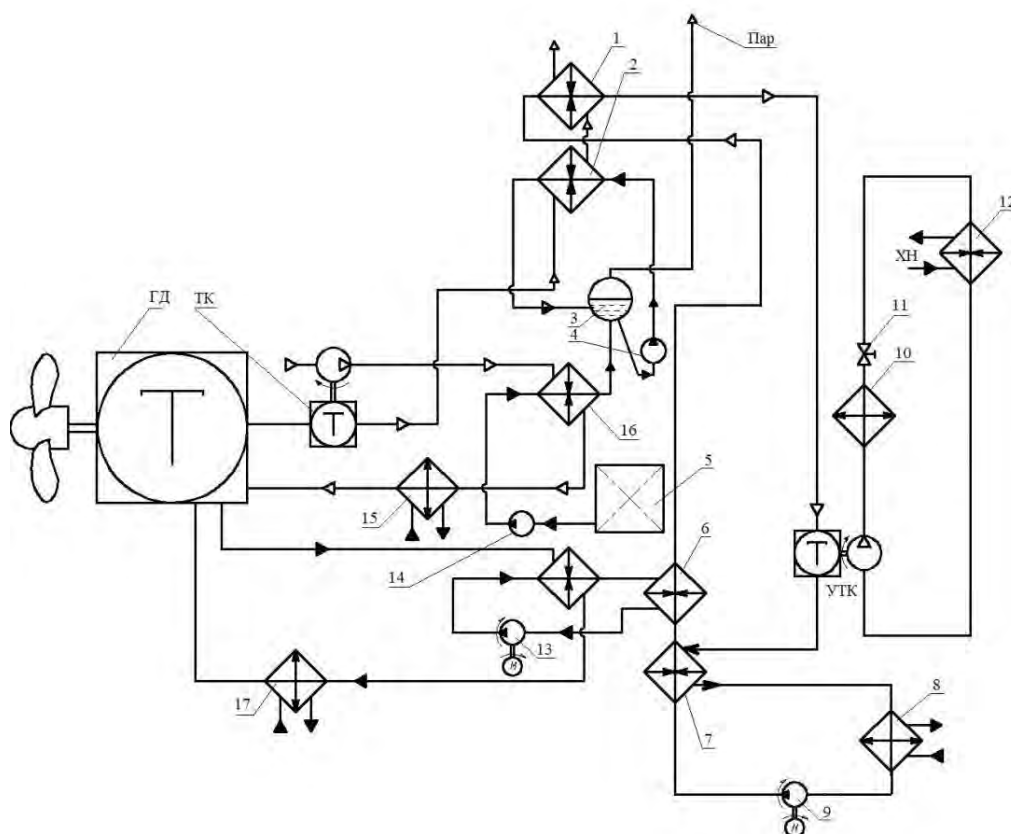


Рис. 3. Схема утилизации на основе хладонового паротурбинного цикла Ренкина.

1 – нагреватель хладона; 2 – УПК; 3 – сепаратор пара УПК; 4 – циркуляционный насос УПК; 5 – теплый ящик; 6 – промежуточный нагреватель; 7 – регенератор; 8 – конденсатор; 9 – насос; 10 – конденсатор; 11 – ТРВ; 12 – испаритель для охлаждения хладоносителя (ХН); 13 – насос; 14 – питательный насос; 15 – воздухоохладитель; 16 – экономайзер; 17 – водоохладитель;

Заключение

На судах рыбопромыслового флота основными источниками вторичных энергоресурсов являются двигатели внутреннего сгорания. Уходящие газы этих двигателей имеют достаточно высокий энергетический потенциал, который может и должен быть превращен в полезную работу с помощью теплоутилизационных установок. В дополнение к уже известным и широко используемым схемам утилизации теплоты уходящих газов дизелей предлагается применение тригенерационных технологий для получения холода, который

востребован на промысловых судах. Частичная замена штатных холодильных машин утилизационными установками позволит не только экономить топливо за счет повышения КПД двигателей, но и сделать утилизационные установки более окупаемыми. Анализ режимов работы различных судов рыбопромыслового флота и нагрузок их главных двигателей позволяет сделать вывод о том, что во время всего рейса утилизационные установки способны работать непрерывно, обеспечивая судну высокий энергетический и экономический эффект.

Литература

1. Маслов В.В. Утилизация теплоты судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 144 с.
2. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel, Copenhagen, Denmark, 2005. 12 p.
3. Пятничко В.А. Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическими теплоносителями. Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 5. С. 10-14.
4. Седельников Г. Д. Энергосберегающие системы малооборотных дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2003. 230 с.
5. Андреев А.А., Смагин Д.Н., Калиниченко И.В. Совершенствование схем утилизации низкопотенциальной теплоты судовых дизельных установок на основе низкокипящих жидкостей. Зб. наук. пр. НУК. Миколаїв: НУК, 2004. №4 (397). С.43-48.

6. Андреев А.А., Смагин Д.Н., Самохвалов В.С., Цвиклис В.С. Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных энергетических установок. Сб. науч. пр. УДМУ. Миколаїв: УДМУ. 2002. № 5 (283). С.66-76.
7. Радченко Н.И., Андреев А.А. Теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха судовых МОД. Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 9 (56). С. 120-24.
8. Данилян А.Г., Чимшир В.И., Власов И.В., Найденов А.И. Новые направления глубокой утилизации тепла судовых дизелей. Вісник Одеського національного морського університету № 3 (49). 2016 С. 91 – 103.
9. Лашко В. А., Седельников Г. Д., Попов А. Ю. Оценка влияния цены топлива на результаты оптимизации энергосберегающих систем судового дизеля. Вестник ТОГУ. 2011. № 2 (21) С. 81 – 88.
10. Сирота А.А., Радченко А.Н., Коновалов Д.В. Основные направления тригенерационных технологий. Техногенна безпека: Наукові праці МДГУ ім. П. Могили. Миколаїв: МДГУ. 2007. Т. 73, Вип. 60. - С. 100-105.
11. Чехранов С.В., Симашов Р.Р., Ханькович И.Н. Развитие теплоутилизационных технологий в судовой энергетике. Морские интеллектуальные технологии, 2017, №3 (37) Т. 2 С.107-111.

References

1. Maslov V.V. Utilizatsiya teploty sudovykh dizeley [Heat recovery of ship diesel engines]. M.: Transport, 1990. 144 s.
2. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel, Copenhagen, Denmark, 2005. 12 r.
3. Pyatnichko V.A. Utilizatsiya nizkopotentsial'nogo tepla v energeticheskikh ustanovkakh s organicheskimi teplonositelyami [Disposal of low-potential heat in power plants with organic heat carriers]. Ekotekhnologii i resursoberezeniye. 2002. № 5. S. 10-14.
4. Sedel'nikov G. D. Energoberegayushchiye sistemy malooborotnykh dizeley [Energy-saving low-speed diesel systems]. Vladivostok: Dal'nauka, 2003. 230 s.
5. Andreyev A.A., Smagin D.N., Kalinichenko I.V. Sovershenstvovaniye skhem utilizatsii nizkopotentsial'noy teploty sudovykh dizeley [Improvement of Low Potential Heat Recovery Schemes for Low Boiling Liquid Diesel Ships]. Zb.. nauk. pr. NUK. Mikolaiv: NUK, 2004. №4 (397). S.43-48.
6. Andreyev A.A., Smagin D.N., Samokhvalov B.C., Tsviklis B.C. Sovremennoye sostoyaniye sistem glubokoy utilizatsii vtorichnykh energoresursov sudovykh dizeley [Current state of systems of deep utilization of secondary energy resources of ship diesel power plants]. Sb. nauk. pr. UDMTU. Mikolaiv: UDMTU. 2002. № 5 (283). S.66-76.
7. Radchenko N.I., Andreyev A.A. Teploispol'zuyushchaya sistema okhlazhdeniya nadduvochnogo vozdukhа sudovykh MOD [Heat-using supercharging air cooling system of ship's MODs]. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2008. № 9 (56). S. 120-24.
8. Danilyan A.G., Chimshir V.I., Vlasov I.V., Naydenov A.I. Novyye napravleniya glubokoy utilizatsii tepla sudovykh dizeley [New directions of deep heat recovery of ship diesel engines]. Bicnik Odes'kogo natsional'nogo mors'kogo universitetu № 3 (49), 2016 S. 91 – 103.
9. Lashko V. A., Sedel'nikov G. D., Popov A. YU. Otsenka vliyaniya tseny topliva na rezul'taty optimizatsii energosberegayushchikh sistem sudovogo dizelya [Assessment of the impact of fuel price on the results of optimization of energy-saving systems of ship diesel]. Vestnik TOGU. 2011. № 2 (21) S. 81 – 88.
10. Sirota A.A., Radchenko A.N., Konovalov D.V. Osnovnyye napravleniya trigeneratsionnykh tekhnologiy [Main directions of trigeneration technologies]. Tekhnogenna bezpeka: Naukovi pratsi MDGU im. P. Mogili. Mikolaiv: MDGU. 2007. T. 73, Vip. 60. - S. 100-105.
11. Chekhranov S.V., Simashov R.R., Khan'kovich I.N. Razvitiye teploutilizatsionnykh tekhnologiy v sudovoy energetike [Development of heat recovery technologies in ship power engineering]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2017, №3 (37) T. 2 S.107-111.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чехранов Сергей Валентинович, 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

Симашов Рафаиль Равильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52-б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), 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

Статья поступила в редакцию / The article was submitted 14.09.2023.

Одобрена после рецензирования / approved after reviewing 09.11.2023.

Принята к публикации / accepted for publication 10.11.2023.

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.014>

Определение скорости рабочего тела в камере сгорания судового дизеля на основе экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра

Руднев Б.И.¹ povalichina@mail.ru, Повалихина О.В.¹ povalichina@mail.ru, Горелик Г.Б.² ggreluk@mail.ru

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,

²Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

Аннотация. Форсирование современных судовых дизелей по параметрам рабочего цикла приводит к весьма значительной интенсификации процесса сгорания топлива. Одним из важнейших параметров, определяющих интенсивность процесса горения является скорость рабочего тела в камере сгорания. Однако ее определение на стадии проектирования судовых дизелей вызывает значительные трудности. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение метода определения скорости рабочего тела в камере сгорания судового высокооборотного дизеля типа 8ЧН 13/14, основанного на использовании экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра. Применение предложенного метода позволяет конструкторам еще на стадии проектирования адекватно задавать локальные значения скорости рабочего тела в камере сгорания и сокращает сроки проектирования и доводки новых моделей судовых дизелей.

Ключевые слова: судовой высокооборотный дизель, камера сгорания, скорость рабочего тела, процесс сгорания топлива

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В., Горелик Г.Б. Определение скорости рабочего тела в камере сгорания судового дизеля на основе экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 110—115. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.014

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.014>

Determination of velocity working gas in marine diesel combustion chamber on the base of experimental data from fluctuations of temperature cylinder cap surface

Boris I. Rudnev¹ povalichina@mail.ru, Olga V. Povalikhina¹ povalichina@mail.ru,

Gennadiy B. Gorelik² ggorelik@mail.ru

¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation, ²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Vladivostok, Russia Federation

Abstract. Rise of modern marine diesels from parameters of working cycle leads to whole respectable intensity of fuel combustion process. One of the most parameters determining intensity combustion process is velocity of working gas in combustion chamber. However its determination in design of marine diesels presents respectable difficulties. Purpose this of article is presentation and discussion of method determination working gas velocity in marine high speed diesel type 8ChN 13/14 of combustion chamber on base of experimental data from fluctuations of temperature cap cylinder surface. Using this method gives the designs in the process of appoints local data of working gas combustion chamber reduces design time and drive of marine diesel of new models.

Key words: marine high speed diesel, combustion chamber, velocity of working gas, process of combustion fuel.

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V., Gorelik G.B. Determination of velocity working gas in marine diesel combustion chamber on the base of experimental data from fluctuations of temperature cylinder cap surface, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 110—115. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.014

Введение

Форсирование современных судовых дизелей по параметрам рабочего цикла приводит к весьма значительной интенсификации процесса сгорания топлива. При этом увеличиваются максимальное давление и температура рабочего тела, возрастают тепловые нагрузки на детали, образующие камеру сгорания (КС). Одним из важнейших параметров, определяющих интенсивность процесса сгорания топлива является скорость рабочего тела в КС [1–4]. Однако ее определение на стадии проектирования судовых дизелей все еще вызывает

значительные трудности. Они обусловлены необходимостью проведения весьма трудоемких расчетов на ЭВМ с применением специализированных пакетов прикладных программ, реализующих математические модели (ММ), учитывающие турбулентный характер процесса сгорания в дизелях и построенных с использованием современных численных методов [5 – 8]. Следует отметить, что использование одно- и двухмерных ММ для численного определения скоростей рабочего тела в КС [9 –12] в настоящее время уже недостаточно и требуется весьма детальное трехмерное моделирование, учитывающее к тому же

различные формы КС [5]. Известно также, что процессы сгорания и теплообмена в КС дизелей носят явно нестационарный характер и при проведении расчетов на ЭВМ возникает вопрос о задании адекватных начальных условий по скоростям рабочего тела [5, 13]. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение метода определения скорости рабочего тела в КС судового высокооборотного дизеля типа 8ЧН 13/14, основанного на использовании экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра. Последние были получены авторами при проведении экспериментальных исследований на указанном выше дизеле.

Экспериментальные данные по колебаниям температуры на поверхности крышки цилиндра судового дизеля и метод определения скорости рабочего тела в камере сгорания

На рис. 1 показана схема расположения железо – никелевых термоприемников на поверхности крышки цилиндров дизеля 8ЧН 13/14 с указанием радиусов их установки.

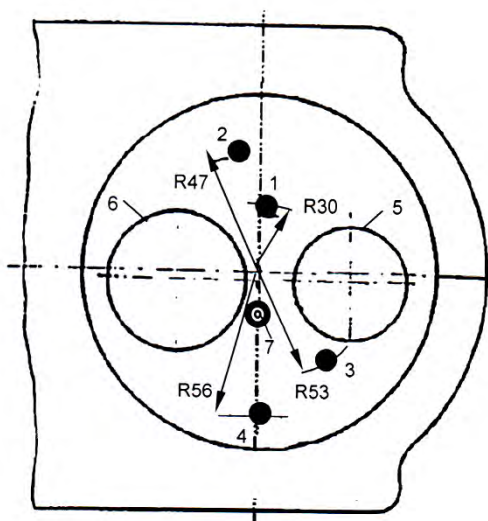


Рис. 1. Расположение поверхностных железо – никелевых термоприемников на поверхности крышки цилиндров дизеля 8ЧН 13/14: 1, 2, 3, 4 – термоприемники; 5 – выпускной клапан; 6 – впускной клапан; 7 – форсунка

Общий вид крышки цилиндров этого дизеля с установленными поверхностными железо – никелевыми термоприемниками и обычными хромо – никелевыми термопарами был представлен ранее в [14]. Полученные в экспериментах осциллограммы с записью колебаний температуры от поверхностных железо – никелевых термоприемников показаны на рис. 2 и 3.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 2 и 3 показывает, что максимальное значение колебаний температуры в точках 1, 2 и 3 поверхности крышки цилиндра достигается при различных углах поворота коленчатого вала (ПКВ) после верхней мертвой точки (ВМТ).

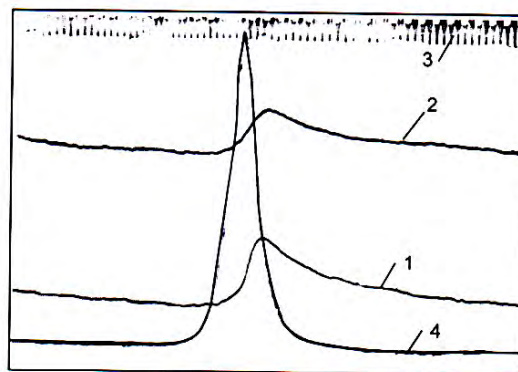


Рис. 2. Осциллограммы колебаний температуры на поверхности крышки цилиндра дизеля 8ЧН 13/14: 1, 2 – кривые колебаний температуры в точках 1 и 2 соответственно; 3 – отметки времени длительностью 0,001с; 4 – давление газов рабочего тела в цилиндре; $P_{me}=0,61\text{ МПа}$, $n=1700\text{ мин}^{-1}$

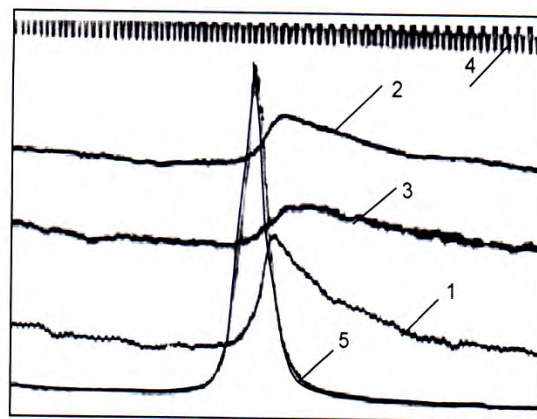


Рис. 3. Осциллограммы колебаний температуры на поверхности крышки цилиндра дизеля 8ЧН 13/14: 1, 2, 3 – кривые колебаний температуры в точках 1, 2 и 3 соответственно; 4 – отметки времени длительностью 0,001с; 5 – давление газов в цилиндре; $P_{me}=0,61\text{ МПа}$, $n=1700\text{ мин}^{-1}$

Это связано с особенностями движения рабочего тела относительно поверхности крышки цилиндра, формой КС и другими газодинамическими факторами. Подробный анализ этих факторов приведен в [1, 2, 4, 5, 13]. Рабочее тело является основным переносчиком энергии в КС дизеля и воздействуя в процессе своего движения на поверхность крышки цилиндра вызывает колебания температуры в ее поверхностном слое. Учитывая, что динамические характеристики поверхностных железо – никелевых термоприемников, использованных в экспериментах, примерно одинаковы (эффективная глубина их горячего спая составляет ~ 20 мкм) [15], различие во времени (или по углу ПКВ) достижение максимального значения колебаний температуры в конкретной точке поверхности крышки цилиндра обусловлена приходом в нее рабочего тела.

Расстояние между точками, в которых установлены поверхностные термоприемники известно (см. рис.1). Время, через которое в них достигается максимальное значение колебаний температуры можно определить по осциллограммам (рис. 2 и 3), используя отметку времени (см. шлейф 3 на рис. 2 и шлейф 4 на рис. 3). В итоге скорость рабочего тела в КС дизеля находится как частное от деления расстояния между точками на время, за которое рабочее тело проходит это расстояние (например, между точками 1 и 2, 1 и 3 и 1 – 4). При этом полученные значения, естественно, являются локальными и относятся соответственно к точкам 2, 3 и 4 (см. рис.1). Результаты расчетов по локальным скоростям рабочего тела с использованием экспериментальных данных по колебаниям температуры представлены на рис. 4.

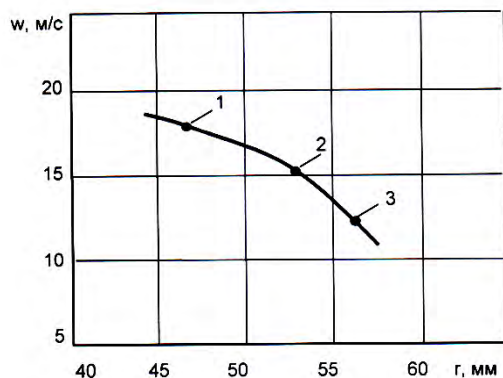


Рис. 4. Изменение локальной скорости рабочего тела в КС дизеля 8ЧН 13/14: 1 – точка 2 с R47; 2 – точка R53; 3 – точка 4 с R56

Для точек 2, 3 и 4, принадлежащих поверхности крышки цилиндра судового высокооборотного дизеля 8ЧН 13/14, были получены следующие значения локальной скорости рабочего тела: 17,5 м/с, 15,3 м/с и 13,2 м/с соответственно.

Анализ результатов по скоростям рабочего тела в КС и их сравнение с другими методами

С целью сравнения и подтверждения возможности использования предложенного в статье метода определения скорости рабочего тела в КС дизеля на основе экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра на рис. 5 и 6 показаны результаты исследований, полученных в [16, 17].

Следует отметить, что эти результаты получены с применением лазерно – доплеровской анемометрии, довольно дорогого и сложного лабораторного оборудования. Анализ,

представленных на рис. 5 и 6 экспериментальных данных по скоростям рабочего тела в КС свидетельствует о хорошем их количественном соответствии результатам, полученным авторами настоящей статьи (см. рис.4).

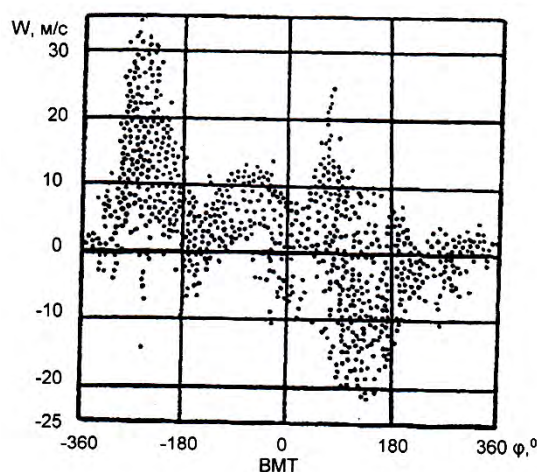


Рис. 5. Экспериментальное значение скорости рабочего тела в КС дизеля, измеренное в 50 мкм от стенки при большой закрутке воздушного заряда, $n = 750 \text{ мин}^{-1}$

Необходимо также отметить, что для определения скорости рабочего тела в КС дизеля по предложенному в статье методу требуются только экспериментальные данные по колебаниям температуры, зафиксированные на разных поверхностях деталей цилиндропоршневой группы. В настоящее время указанные выше экспериментальные данные хорошо систематизированы и представлены в ряде работ [18 – 20]. Это существенно облегчает использование предложенного метода.

Заключение

Представленный в статье метод определения скорости рабочего тела в КС судового высокооборотного дизеля на основе экспериментальных данных по колебаниям температуры поверхности крышки цилиндра дает конструкторам возможность еще на стадии проектирования адекватно задавать локальные значения указанного выше параметра. Это способствует более глубокому пониманию газодинамики горения в двигателях внутреннего сгорания и сокращает сроки проектирования и доводки новых моделей судовых дизелей.

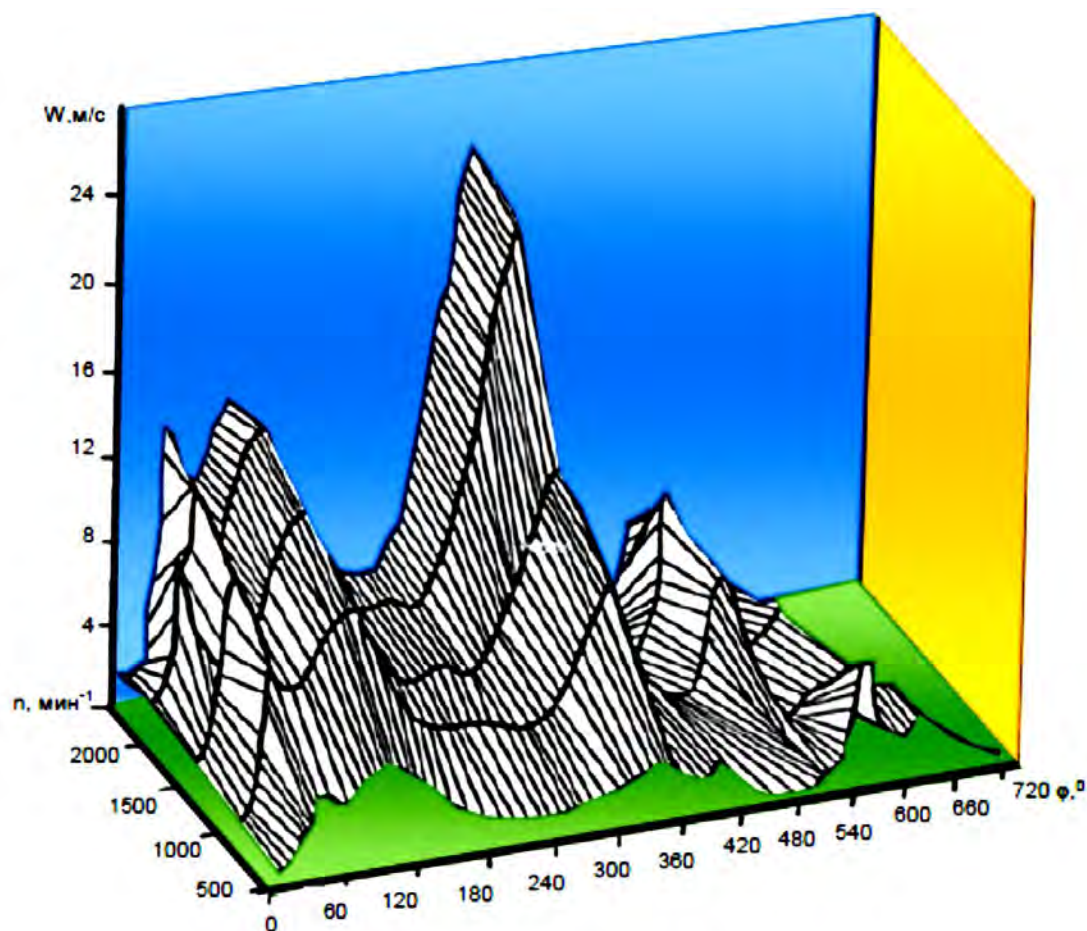


Рис. 6. Изменение средней скорости рабочего тела в КС дизеля

Литература

1. Бартльме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981, 280 с.
2. Сполдинг Д.В. Горение и массообмен. М.: Машиностроение, 1985, 240 с.
3. Круглов М.Г., Медков А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1988, 380 с.
4. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986, 288 с.
5. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 85 с.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х т., Т.2. М.: Мир, 1991, 552 с.
7. Зарубин В.С., Кувыркин Г.И. Математические модели механики и электродинамики сплошной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 512 с.
8. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988, 544 с.
9. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.
10. Rudnev B.I. Numerical experimental value of total conditions of heat transfer in a combustion chamber of transport diesel // Proceedings International Conference of IC Engines, KONES'89, Wroclaw, Poland, 1989, P. 304 – 308.
11. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Численное определение полей скоростей рабочего тела в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2020, №4, Т.1, С. 92 – 97.
12. Rudnev B.I., Bespalov V.M., Izrailsky Yu.G., Tsitsiashvili G.Sh. A simple model of convective heat transfer in the combustion chamber of diesel engine // Fourth International Symposium on Small Diesel Engines // Journal of Polish CIMAC, Warsaw, Poland, 1996, Vol.2, No. 1, P. 177 – 182.
13. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003, 840 с.
14. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Результаты экспериментального исследования локальных тепловых потоков на поверхности крышки цилиндров судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2022, №4, Часть 1, С. 123 – 127.
15. Руднев Б.И., Повалихина О.В., Огай С.А. Экспериментальное определение динамических характеристик поверхностных термоприемников для исследования локального теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Транспортное дело России, 2023, №4, С. 201 – 205.

16. Ball W.F., Pettifev H.F., Waterhouse C.N.F. Laser Doppler velocimeter measurements of turbulence in a direct-injection diesel combustion chamber // Int. Conf. Eng., Oxford, Vol. 1, London, 1983, P. 163 – 174.
17. Yang J., Pierce P., Martin J.K., Foster D.E. Heat transfer predictions and experiments in a motored engine // SAE Preprints, 1988. № 881314, 15 p.
18. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979, 222 с.
19. Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. Работа газовых дизелей в условиях эксплуатации: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989, 284 с.
20. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472 с.

References

1. Bartl'me F. Gazodinamika goreniya [Gas dynamics of combustion]. M.: EHnergoizdat, 1981, 280 s.
2. Spolding D.V. Gorenje i massoobmen [Combustion and mass exchange]. M.: Mashinostroenie, 1985, 240 s.
3. Kruglov M.G., Medkov A.A. Gazovaya dinamika kombinirovannykh dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Gas dynamics of composite internal combustion engines]. M.: Mashinostroenie, 1988, 380 s.
4. Kuznetsov V.R., Sabel'nikov V.A. Turbulentnost' i gorenje [Turbulence and combustion]. M.: Nauka, 1986, 288 s.
5. Kavtaradze R.Z., Onishhenko D.O., Zelentsov A.A. Trekhmernoe modelirovanie nestatsionarnykh teplofizicheskikh protsessov v porshnevykh dvigatelyakh [Three dimension modeling non-stationary heat-physical of processes in piston engines]. M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2012, 85 s.
6. Fletcher K. Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostej: V 2-kh t., T.2. [Computational techniques for fluid dynamics] M.: Mir, 1991, 552 s.
7. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.I. Matematicheskie modeli mekhaniki i ehlektrostatiki sploshnoj sredy [Mathematical models of mechanics and electric dynamics]. M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2008, 512 s.
8. SHI D. CHislennye metody v zadachakh teploobmena [Numerical heat transfer]. M.: Mir, 1988, 544 s.
9. Rudnev B.I. Protsessy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya dizelej [Processes local heat transfer in diesels combustion chamber] // Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
10. Rudnev B.I. Numerical experimental value of total conditions of heat transfer in a combustion chamber of transport diesel // Proceedings International Conference of IC Engines, KONES'89, Wroclaw, Poland, 1989, P. 304 – 308.
11. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. CHislennoe opredelenie polej skorostej rabocheho tela v kamere sgoraniya sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Numerical determination of the velocity fields of the working medium in the combustion chamber of a marine high-speed diesel engine] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2020, №4, T.1, S. 92 – 97.
12. Rudnev B.I., Bepalov V.M., Izrail'sky Yu.G., Tsitsiashvili G.Sh. A simple model of convective heat transfer in the combustion chamber of diesel engine // Fourth International Symposium on Small Diesel Engines // Journal of Polish CIMAC, Warsaw, Poland, 1996, Vol.2, No. 1, P. 177 – 182.
13. Lojtsyanskij L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of fluid and gas]. M.: Drofa, 2003, 840 s.
14. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. rezul'taty ehksperimental'nogo issledovaniya lokal'nykh teplovykh potokov na poverkhnosti kryshki tsilindrov sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Results of experimental investigation of local heat fluxes on surface of cap cylinders of marine high speed diesel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2022, №4, CHast' 1, S. 123 – 127.
15. Rudnev B.I., Povalikhina O.V., Ogaj S.A. EHksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik poverkhnostnykh termopriemnikov dlya issledovaniya lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya sudovogo vysokooborotnogo dizelya [Experimental determination of dynamics characteristics of surface thermocouples for investigation of local heat transfer in marine high speed diesel of combustion chamber] // Transportnoe delo Rossii, 2023, №4, S. 201 – 205.
16. Ball W.F., Pettifev H.F., Waterhouse C.N.F. Laser Doppler velocimeter measurements of turbulence in a direct-injection diesel combustion chamber // Int. Conf. Eng., Oxford, Vol. 1, London, 1983, P. 163 – 174.
17. Yang J., Pierce P., Martin J.K., Foster D.E. Heat transfer predictions and experiments in a motored engine // SAE Preprints, 1988. № 881314, 15 p.
18. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: Справочное пособие [Heat-stress of internal combustion engine. Handbook]. L.: Mashinostroenie, 1979, 222 s.
19. Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. Работа газовых дизелей в условиях эксплуатации: Справочник [Work of diesels in conditions of exploitation. Handbook]. L.: Mashinostroenie, 1989, 284 s.
20. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevykh dvigatelyakh [Local heat transfer in piston of engines]. M.: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2007, 472 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52Б, e-mail: povalichina@mail.ru

Повалихина Ольга Владимировна, доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет 690087, Владивосток ул. Луговая, 52Б, e-mail: povalichina@mail.ru

Горелик Геннадий Бенцианович, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научного департамента Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690000, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: ggorelik@mail.ru

Boris I. Rudnev, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Olga V. Povalikhina, assistant professor, assistant professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, St. Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: povalichina@mail.ru

Gennadiy B. Gorelik, Dr. Sci. (Eng), Professor, senior researcher of the scientific department of the Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Vladivostok, Russia Federation, Verhneportovay str. 50a, Vladivostok, 690000, Russian Federation, e-mail: ggorelik@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2023.

Научная статья

УДК 621.5.00

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.015>

Повышение эффективности вычислений внешней скоростной характеристики судовых поршневых двигателей на основе моделирования с идентификацией функции Лейдермана

Боран-Кешишьян А.Л.¹ bk.anastas@gmail.com, Владецкая Е.А.¹ vladetska@rambler.ru,Харченко А.О.² khao@list.ru, Харченко А.А.² a.a.kharchenko@sevsu.ru¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск²Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Аннотация. В статье приведены результаты применения методики определения внешней скоростной характеристики судовых поршневых двигателей путем уточнения параметров функций Лейдермана. Приведены научно-методические и программные разработки авторов, а также результаты стендовых испытаний судового дизельного двигателя морского исполнения. Предложенный подход к моделированию на основе системы полиномиальных функций с постоянными коэффициентами и уточнением параметров для технических объектов на примере судовых главных поршневых двигателей по результатам стендовых испытаний повышает эффективность определения внешней скоростной характеристики. Проверка корректности изложенной методики реализована с помощью процедуры имитационного моделирования. Величина максимальной относительной погрешности приближения в заданном диапазоне относительных частот вращения составила 1,1% при погрешности измерений 1% эффективного момента вращения коленчатого вала двигателя. Данный подход может быть использован также при решении задач разработки и модернизации других судовых систем и агрегатов.

Ключевые слова: судовой поршневой двигатель, модель Лейдермана, внешняя скоростная характеристика, метод наименьших квадратов, дисперсия, погрешность.

Для цитирования: Боран-Кешишьян А.Л., Владецкая Е.А., Харченко А.О., Харченко А.А. Повышение эффективности вычислений внешней скоростной характеристики судовых поршневых двигателей на основе моделирования с идентификацией функции Лейдермана, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 116—122. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.015

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.015>

Improving the efficiency of calculating the external velocity characteristic of marine piston engines based on modeling with Leiderman function identification

Anastas L. Boran-Keshishyan¹ bk.anastas@gmail.com, Ekaterina A. Vladetskaya¹ vladetska@rambler.ru,Alexander O. Kharchenko² khao@list.ru, Andrey A. Kharchenko² a.a.kharchenko@sevsu.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, ²Sevastopol State University

Abstract. The article presents the results of applying the methodology for determining the external speed characteristic of marine piston engines by refining the parameters of the Leiderman functions. The scientific, methodological and software developments of the authors, as well as the results of bench tests of a marine marine diesel engine, are presented. The proposed approach to modeling based on a system of polynomial functions with constant coefficients and refinement of parameters for technical objects using the example of ship main piston engines based on the results of bench tests increases the efficiency of determining the external speed characteristic. The verification of the correctness of the described technique is implemented using the simulation procedure. The value of the maximum relative error of approximation in a given range of relative speeds was 1.1% with a measurement error of 1% of the effective torque of the engine crankshaft. This approach can also be used in solving the problems of development and modernization of other ship systems and units.

Keywords: marine piston engine, Leiderman model, external velocity characteristic, least squares method, dispersion, error.

For citation: Anastas L. Boran-Keshishyan, Ekaterina A. Vladetskaya, Alexander O. Kharchenko, Andrey A. Kharchenko, Improving the efficiency of calculating the external velocity characteristic of marine piston engines based on modeling with Leiderman function identification, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 116—122. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.015

Введение

В зависимости от назначения в народном хозяйстве применяют различные двигатели, в частности, предназначенные для установки на судах или других плавсредствах, которые должны быть

оборудованы в соответствии с требованиями Регистра России для привода судовых движителей или вспомогательных агрегатов [1, 2]. Они делятся на главные, являющиеся источником энергии для выполнения основной задачи судна (у транспортных судов — приведение в действие судового движителя)

и вспомогательные (для приводов электрогенераторов судовых электростанций, лебедок, компрессоров, насосов и других механизмов). На транспорте среди двигателей внутреннего сгорания (ДВС) наиболее широкое распространение получили поршневые двигатели (ПД). Широко распространены также транспортные автомобильные и тракторные двигатели, измененные и приспособленные для работы например, в качестве судовых, получившие название конверсионных [3].

Управление режимом работы ПД связано с обеспечением оптимальных режимов, позволяющих реализовать максимальные значения эффективной мощности и крутящего момента при минимальном потреблении топлива. В качестве модели, позволяющей решить эти задачи, применяют аналитическую модель Лейдермана (систему полиномиальных функций с постоянными коэффициентами) [4, 5], которая не учитывает конструктивных особенностей модификаций двигателей, влияния воздействия окружающей среды и других факторов (качества топлива, пробега, особенностей обслуживания и т.п.), являющихся следствием эксплуатации судового транспортного средства.

Приведены научно-методические и программные разработки авторов, выполненные в Государственном морском университете им. адм. Ф.Ф. Ушакова и в Севастопольском государственном университете, а также результаты стендовых испытаний судового дизельного двигателя морского исполнения мощностью 54 л.с. Weichai Power, потребовавшиеся для комплекса расчетов агрегатов и подсистем при решении задач учебного и научного характера (рисунок 1, а, б).



а



б

Рис. 1. Общий вид судового дизельного двигателя WP4.1C54-15 (Weichai Power, KHP) (а) и стенда (б) для проведения испытаний поршневых двигателей

Цель приведенных в статье материалов – повышение эффективности вычислений внешней скоростной характеристики судовых главных поршневых двигателей путем уточнения параметров функций Лейдермана по результатам их стендовых испытаний при решении задач разработки и модернизации судовых систем и агрегатов.

Основная часть

Аналитическая модель Лейдермана представляет собой систему полиномиальных функций с постоянными коэффициентами. Значения указанных коэффициентов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты формул Лейдермана

Двигатели	A	B	C	A ₁	B ₁	C ₁
Карбюраторные	1	1	1	1,2	1	0,8
Дизельные						
с непосредственным впрыском	0,87	1,4	1	1,55	1,55	1
предкамерные	0,6	1,4	1	1,2	1,2	1
форкамерные	0,7	1,3	1	1,35	1,35	1

По результатам стендовых испытаний уточняются параметры функций Лейдермана. Одна из основных – внешняя скоростная характеристика поршневого двигателя, состоящая из характеристик:

А) эффективной мощности

$$N_e = N_m \left(A \frac{n}{n_e} + B \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 - C \left(\frac{n}{n_e} \right)^3 \right), \quad (1)$$

где n – текущее значение частоты вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; n_e – частота вращения, соответствующая максимальной мощности, мин^{-1} ; N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, кВт ; N_m – максимальное значение эффективной мощности двигателя, кВт ;

Б) эффективного крутящего момента

$$M_e = M_k \left(A + B \frac{n}{n_e} - C \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где M_e – текущее значение крутящего момента, $\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_k = K_m N_m$ – значение крутящего момента при значении частоты вращения коленчатого вала двигателя, соответствующего максимальной мощности двигателя N_m , $\text{Н}\cdot\text{м}$; K_m – масштабный коэффициент; $K_m = 3 \cdot 10^4 / n_e \pi$;

В) эффективного расхода топлива

$$G_e = G_m \left(A_1 - B_1 \frac{n}{n_e} + C_1 \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где G_e – текущий удельный расход топлива, $\text{г/кВт}\cdot\text{ч}$; G_m – удельный расход топлива при максимальной мощности, $\text{г/кВт}\cdot\text{ч}$;

Г) часового расхода топлива

$$G_t = 10^{-3} G_e N_e, \quad (4)$$

Д) среднего эффективного давления

$$P_e = \frac{30 N_e T}{V_c n}, \quad (5)$$

где V_c – объем двигателя, л; T – тактность двигателя.

Кроме вышеуказанных могут быть и другие характеристики, получаемые расчетным путем.

Для упрощения анализа преобразуем характеристики (1), (2), (3), сведя их к безразмерной форме. Тогда можно записать:

$$F_n = x(A + Bx - Cx^2);$$

$$F_m = A + Bx - Cx^2; F_g = A_1 - B_1x + C_1x^2, \quad (6)$$

где $F_n = N_e / N_m$; $F_m = M_e / K_m N_m$;
 $F_g = G_e / G_m$; $x = n / n_e$.

Функции (6) позволяют выявить экстремальные значения, которые можно определить в результате аналитического исследования [5-8]. В результате выбора производных этих функций и приравнивания к нулю, получим:

$$A + 2B - 3Cx^2 = 0; B - 2Cx = 0; B_1 - 2C_1x = 0. \quad (7)$$

Решив уравнения (7), найдем абсциссу и ординату положения экстремума функций:

$$x_n = \frac{B + \sqrt{B^2 + 3AC}}{3C} \quad \text{— абсцисса максимума}$$

функции F_n ;

$$F_{n \max} = \frac{x_n(2A + x_n B)}{3} \quad \text{— значение максимума}$$

функции F_n ;

$$x_m = \frac{B}{2C} \quad \text{— абсцисса максимума функции } F_m;$$

$$F_{m \max} = A + \frac{x_m B}{2} \quad \text{— значение максимума}$$

функции F_m ;

$$x_g = \frac{B_1}{2C_1} \quad \text{— абсцисса минимума функции } F_g;$$

$$F_{g \min} = A_1 + \frac{x_m B_1}{2} \quad \text{— значение минимума}$$

функции F_g .

Для получения рассматриваемых характеристик необходимо вычислить коэффициенты Лейдермана, минимальный эффективный расход топлива G_{min} , максимальный эффективный вращающий момент M_m и максимальную эффективную мощность N_m , которые связаны соотношением:

$$M_m = \frac{3 \cdot 10^4 N_m}{n_m \tau}. \quad (8)$$

В качестве примера на рисунке 2 представлены функции (6) для ПД с непосредственным впрыском. Масштабным коэффициентом является n_e по оси абсцисс x . По оси ординат F масштабными коэффициентами выступают G_m – для характеристики эффективного расхода топлива, N_m – для характеристики эффективной мощности, M_m – для характеристики эффективного крутящего момента.

Данные, получаемые в процессе стендовых испытаний, содержат случайную погрешность, величина которой зависит от класса точности

измерительного средства [4, 9-11]. С целью снижения влияния случайной погрешности можно применить процедуру аппроксимации. Наиболее удобной представляется аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК), заключающаяся в том, что вычисляется минимум квадрата приближающей функции для всех точек измерения по каждому [12-14]. Решение полученной таким образом системы уравнений, число которых равно числу искомых параметров, позволяет определить их значения

(G_{min} , G_m , M_m и N_m).

Описание изменения множества функций $F = \{F_n(x), F_m(x), F_g(x)\}$ вблизи точек экстремума получим для каждой составляющей внешней скоростной характеристики ПД:

$$D_n = F_{n \max} - F_n; D_m = F_{m \max} - F_m; D_g = F_g - F_{g \min}.$$

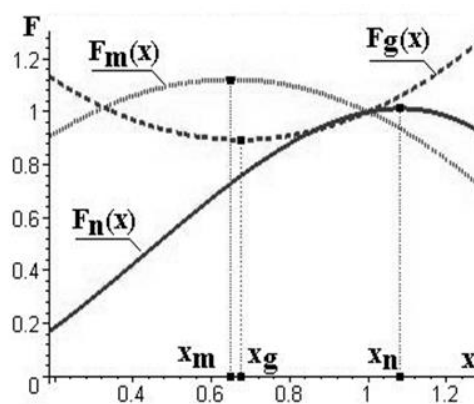


Рис. 2. Графики нормированной внешней скоростной характеристики

На рисунке 3 показаны графики изменения функций множества (F) составляющих внешней скоростной характеристики ПД в окрестности точки экстремума характеристики эффективного расхода топлива (D_g) для эффективной мощности (D_n) и эффективного крутящего момента (D_m) при изменениях режима работы двигателя. На рисунке нанесена линия расхода топлива $q = 0,1$, которая соответствует 10 % изменения. Штриховкой обозначена область допустимых изменений расхода топлива, что позволяет оценить изменение силовых параметров двигателя при наложенных ограничениях по допустимому уровню q расхода топлива.

Проведенный анализ позволяет предложить версию процедуры идентификации функций Лейдермана.

Реализации методики

По результатам испытаний требуется найти параметры внешней скоростной характеристики G_{min} , G_m , M_m , N_m и коэффициенты Лейдермана. С учетом их функциональной взаимосвязи получение искомых параметров рекомендуется производить в следующем порядке:

1) методом наименьших квадратов найти приближающую функцию эффективного крутящего момента;

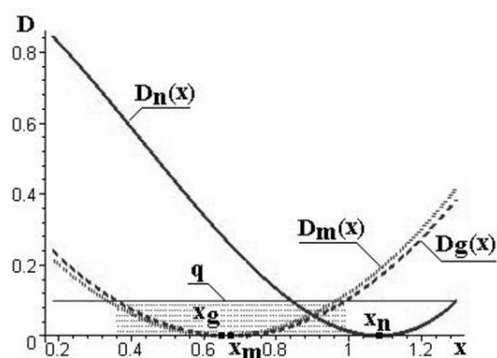


Рис. 3. Относительное превышение расхода топлива

2) исследовать ее на экстремум и получить значения M_m , N_m и G_m ;

3) вычислить коэффициенты A ; B ; C .

Коэффициенты функции расхода топлива A_1 , B_1 , C_1 могут быть найдены в аналогичной последовательности по таблице данных расхода:

1) методом наименьших квадратов найти приближающую функцию эффективного расхода топлива;

2) исследовать ее на экстремум и получить значение G_{min} , вычислить коэффициенты A_1 ; B_1 ; C_1 .

Процедура МНК приближения

Рассмотрим методику МНК приближения характеристики эффективного крутящего момента M_e с помощью математического пакета прикладных программ Maple. Из таблицы 2 по результатам измерения значений характеристики эффективного крутящего момента $Y(x) = M_e(x)$ сформируем множество ординат, множество абсцисс, затем применим пакет программ приближения fit для приближающей полиномиальной функции $y(x)$ n -го порядка:

$$y(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$$

обозначив её через $W = y(x)$ и приняв $n = 2$ для заданного числа измерений m :

Таблица 2

Значения приближаемой $Y(x)$ и приближающей $y(x)$ функций

Результаты измерений	$Y(x)$	$Y(x_1)$	$Y(x_2)$	...	$Y(x_m)$
	x	x_1	x_2	...	x_m
Приближающая функция	$y(x)$	$y(x_1)$	$y(x_2)$	...	$y(x_m)$

```
# Процедура МНК приближения
W:=sum('a[j]*x^j','j'=0...n): # приближающий
полином
Sy:=[seq(Y[i],i=1...m)]: # множество ординат
Sx:=[seq(X[i],i=1...m)]: # множество абсцисс
MNK:=fit[leastsquare][x,y,y=W][[Sx,Sy]];
Rez:=evalf[3](MNK); # результат
приближения
assign(Rez): # присвоение значений
```

В результате решения получены значения коэффициентов a_0 ; a_1 ; a_2 приближающей функции $y(x)$, которая определена в диапазоне значений $[x_1, x_m]$.

Определение максимального крутящего момента

Следующий этап состоит в определении максимального значения эффективного крутящего момента M_m , который является максимумом приближающей функции $y(x)$ и может быть определен с помощью оператора maximize в формате:

$$Mm:=\text{maximize}(y,x=0...x_0),$$

где $x_0 = n_0/n_e$, n_0 – максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя.

Положение точки максимума x_m можно найти в результате решения уравнения $y(x) = M_m$ относительно переменной x :

$$xm:=\text{max}(\text{solve}(y=Mm,x));$$

либо вычислить по формуле $x_m = \frac{B}{2C}$,

полученной в результате предыдущего анализа.

Вычисление коэффициентов функции Лейдермана

Зная значения коэффициентов a_0 ; a_1 ; a_2 приближающей функции $y(x)$, можно определить коэффициенты Лейдермана:

$$A = a_0/a_2; B = a_1/a_2; C = a_2/a_2 = 1.$$

Имитационная модель

Проверка корректности изложенной методики реализована с помощью процедуры имитационного моделирования. Для предкамерного ПД (таблица 1) при значении $M_k = 10^3$ сформирована таблица 2, где $Y(x_j) = M_k(F_m(x_j) + \xi_j)$, ξ_j – случайная погрешность ($j = [1 \dots m]$), равномерно распределенная в интервале $\pm E$, $E = 10^{-2}$ – погрешность измерений, при $m = 20$, в заданном диапазоне относительных частот вращения $x = [x_j \dots x_0]$; x_j – относительная частота вращения режима холостого хода, x_0 – максимальная относительная частота вращения коленчатого вала двигателя. Среди основных параметров двигателя вычислен коэффициент приспособляемости двигателя $K_z = M_m/M_n$.

На рисунке 4 изображена приближаемая $Y(x)$ и приближающая $y(x)$ функции, нанесено значение максимального вращающего момента M_m и момента при максимальной мощности M_n .

На рисунке 5 изображена кривая погрешности приближения в заданном диапазоне относительных частот вращения $[x_j \dots x_0]$ коленчатого вала двигателя.

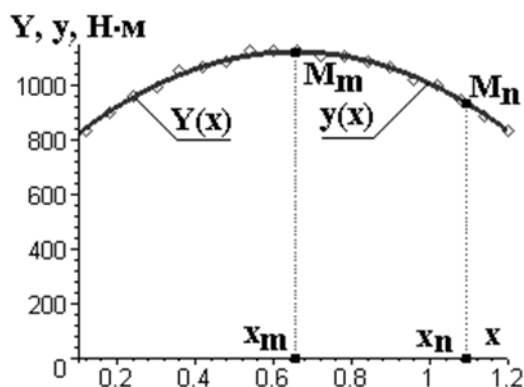


Рис. 4. Результат приближения

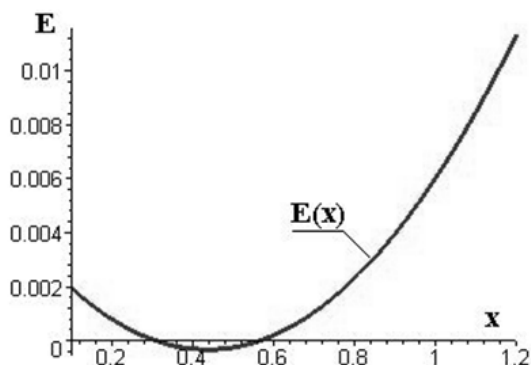


Рис. 5. График погрешности МНК аппроксимации

Величина максимальной относительной погрешности приближения составила 1,1 % при погрешности измерений 1 % эффективного момента вращения коленчатого вала двигателя. Рассчитаны основные параметры модели:

$$M_m = 1122,5 \setminus 1122,5; \quad M_n = 935,7 \setminus 935,65;$$

$$M_k = 977,62 \setminus 1000; \quad K_z = 1,1996 \setminus 1,1997;$$

$$x_m = 0,650 \setminus 0,655; \quad x_n = 1,09 \setminus 1,08; \quad A = 0,719 \setminus 0,7;$$

$$B = 1,31 \setminus 1,30; \quad C = 1,0 \setminus 1,0.$$

В параметрах через косую черту приведены ожидаемые (теоретические) значения.

Закключение

Предложенный подход [15, 16] к моделированию на основе системы полиномиальных функций с постоянными коэффициентами и уточнением параметров для технических объектов на примере судовых главных поршневых двигателей по результатам стендовых испытаний повышает эффективность определения внешней скоростной характеристики двигателя. Он может быть использован также при решении задач разработки и модернизации других судовых систем и агрегатов. Необходимо заметить, что существует возможность повышения качества модели, так как с увеличением числа измерений погрешность приближения и результатов вычисления параметров уменьшается. Задачей дальнейших исследований может служить разработка методики идентификации функций мощности и расхода топлива судового поршневого двигателя.

Литература

- ГОСТ 10448-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний. Москва. Стандартинформ. 2015.
- Российский морской регистр судоходства. Регистровая книга. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/regbook Vessel>
- Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 1. СПб, изд. «Моркнига», 2010, 260 с.
- Хемминг Р.В. Численные методы. М., изд. «Наука», 1972, 400 с.
- Орлин А.И., Круглов М.Т. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. М., изд. «Машиностроение», 2003, 382 с.
- Грехов Л.В, Иващенко Н.А. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-I4. М., «Машиностроение», 2013, 784 с.
- Дьяченко Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. Рабочие процессы. Л., изд. «Машиностроение», 1974, 550 с.
- Костоглотов, А.А. Идентификация параметров динамических систем на основе объединенного принципа максимума. А.А. Костоглотов, В.В. Дерюшев, А.И. Костоглотов. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2004. №2. С. 13-18.
- Дерюшев, В.В. Аппроксимация скоростных характеристик двигателей внутреннего сгорания. В.В. Дерюшев, В.Ю. Бобыльченко. Научное обозрение. 2014. №11-3. С. 773-774.
- Колчин, А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М., изд. «Высшая школа», 2003, 496 с.
- Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов. М., изд. «Транспорт», 1990, 368 с.
- Луканин В.Н., К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов. В 3 кн. - Кн. 1. М., изд. «Высшая школа», 1995, 368 с.
- Ефремов, Л.В. Проблемы управления надежно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб, изд. Art-Xpress, 2015, 206 с.
- Калявин, В.П. Основы теории надежности и диагностики. СПб, изд. «Элмор», 1998, 172 с.
- Харченко А.О. Идентификация функций Лейдερмана при расчете автомобильных двигателей. А.О. Харченко, В.П. Долгин, А.А. Харченко. Мир транспорта и технологических машин. 2020. №1 (68). С. 3-10.
- Долгин В.П., Харченко А.О. Надежность технических систем. М. изд. «Вузовский учебник: ИНФРА-М», 2017, 167 с.

References

1. GOST 10448-2014. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye [Internal combustion engines, reciprocating]. Priemka. Metody ispytaniy. Moskva. Standartinform. 2015.
2. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Registrovaya kniga [Register Book]. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://lk.rs-class.org/regbook/regbook Vessel>.
3. Voznitskiy I.V., Punda A.S. Sudovyye dvigateli vnutrennego sgoraniya [Marine internal combustion engines]. Tom 1. SPb, izd. «Morkniga», 2010, 260 s.
4. Khemming R.V. Chislennyye metody [Numerical methods]. M., izd. «Nauka», 1972, 400 s.
5. Orlin A.I., Kruglov M.T. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley [Internal combustion engines: Theory of reciprocating and combined engines]. M., izd. «Mashinostroyeniye», 2003, 382 s.
6. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines]. T. IV-14. M., «Mashinostroyeniye», 2013, 784 s.
7. D'yachenko N.KH. Teoriya dvigateley vnutrennego sgoraniya. Rabochiye protsessy [Theory of internal combustion engines. Work processes]. L., izd. «Mashinostroyeniye», 1974, 550 s.
8. Kostoglotov A.A., Deryushev V.V., Kostoglotov A.I. Identifikatsiya parametrov dinamicheskikh sistem na osnove ob'yedinennogo printsipa maksimuma [Identification of parameters of dynamic systems based on the combined maximum principle]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki. 2004. №2. pp. 13-18.
9. Deryushev V.V., Bobyl'chenko V.YU. Approksimatsiya skorostnykh kharakteristik dvigateley vnutrennego sgoraniya [Approximation of the speed characteristics of internal combustion engines]. Nauchnoye obozreniye. 2014. №11-3. pp. 773-774.
10. Kolchin, A.I., Demidov V.P. Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley [Calculation of automobile and tractor engines]. M., izd. «Vysshaya shkola», 2003, 496 s.
11. Samsonov V.I., Khudov N.I. Dvigateli vnutrennego sgoraniya morskikh sudov [Marine internal combustion engines]. M., izd. «Transport», 1990, 368 s.
12. Lukanin V.N., Morozov K.A., Khachiyan A.S. i dr. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya rabochikh protsessov [Internal combustion engines. Theory of work processes]. V 3 kn. – Kn.1. M., izd. «Vysshaya shkola», 1995, 368 s.
13. Yefremov, L.V. Problemy upravleniya nadezhnostno-orientirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin [Problems of control of reliability-oriented technical operation of machines]. SPb., izd. Art-Xpress, 2015, 206 s.
14. Kalyavin, V.P. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostiki [Fundamentals of the theory of reliability and diagnostics]. SPb, izd. «Elmor», 1998, 172 s.
15. Kharchenko A.O., Dolgin V.P., Kharchenko A.A. Identifikatsiya funktsiy Leydermana pri raschete avtomobil'nykh dvigateley [Identification of Leiderman functions in the calculation of automobile engines]. Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2020. №1 (68). pp. 3-10.
16. Dolgin V.P., Kharchenko A.O. Nadezhnost' tekhnicheskikh system [Reliability of technical systems]. M. izd. «Vuzovskiy uchebnyk: INFRA-M», 2017, 167 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Боран-Кешишьян Анастас Леонидович, кандидат технических наук, проректор Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т Ленина, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Владецкая Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой энергетики и электрооборудования, Морской институт им. вице-адмирала В.А. Корнилова - филиал ФГБОУ ВО "ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова", 299053, Севастополь, ул. Героев Севастополя, 11, корпус 8/22, e-mail: vladetska@rambler.ru

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph.D. Sci. (Eng), vice-rector of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Ekaterina A. Vladetskaya, Ph.D. Sci. (Eng.), Assosiat Professor of the Department of Ship energy and electrical equipment", Vice-admiral V.A. Kornilov Maritime Institute - branch of "AUMSU", Sevastopol, Geroyev Sevastopolya St., 11, building 8/22, e-mail: vladetska@rambler.ru

Харченко Александр Олегович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: khao@list.ru

Alexander O. Kharchenko, Ph.D. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical engineering technology, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: khao@list.ru

Харченко Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: a.a.kharchenko@sevsu.ru

Andrey A. Kharchenko, Ph.D. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automobile transport, Sevastopol state university, 33 Universitetskaya, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: a.a.kharchenko@sevsu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 16.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 22.11.2023.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.016>

Применение закона пропорциональной навигации для наведения автономных подводных аппаратов

Скороход Б.А.¹ boris.skorohod@mail.ru

¹Севастопольский государственный университет

Аннотация. Рассматривается задача наведения автономного подводного аппарата (АПА) на заданный объект. Предполагается, что АПА под действием силы тяги и поворотного момента, перемещается в горизонтальной плоскости. Неизвестное постоянное течение рассматривается в качестве основного возмущения подводной среды действующего на АПА. Пропорциональный закон навигации (ПЗН) формируется по изображениям, поступающих с видеокамеры или гидроакустического датчика, измеряя скорость изменения угла визирования объекта. Показывается, что решение задачи наведения может быть сведено к анализу устойчивости нелинейной нестационарной системы с особой точкой. Предлагаемый в работе подход основан на специальных определениях устойчивости решений такой системы и методе функций Ляпунова. Получены условия устойчивости процесса наведения АПА, обеспечивающие его желаемое поведение. Приведены результаты компьютерного моделирования, включающие оценки точности и сравнительный анализ использования ПЗН и метода погони.

Ключевые слова: системы с неполным приводом, автономные подводные аппараты, функции Ляпунова, сингулярная точка

Для цитирования: Скороход Б.А. Применение закона пропорциональной навигации для наведения автономных подводных аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 123—133. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.016

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.016>

Application of the proportional navigation law for guidance of autonomous underwater vehicles

Boris A. Skorohod¹ boris.skorohod@mail.ru

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract. The problem of guidance autonomous underwater vehicles (AUV) to a given object is considered. It is assumed that the AUV moves in a horizontal plane under the action of the thrust force and the turning moment. An unknown constant current is considered as the main disturbance of the underwater environment acting on the AUV. The proportional navigation law (PNL) is formed from images coming from a video camera or a sonar sensor, measuring the rate of change in the angle of sight of the object. It is shown that the solution of the guidance problem can be reduced to an analysis of the stability of a nonlinear non-stationary system with a singular point. The approach proposed in this paper is based on special definitions of the stability of solutions of such a system and the method of Lyapunov functions. The stability conditions of the AUV guidance process have been obtained providing its desired behavior. The results of computer modeling are presented including accuracy estimates and a comparative analysis of the use of PNL and the pursuit guidance.

Keywords: underactuated systems, autonomous underwater vehicles, Lyapunov function, singular point

For citation: Boris A. Skorohod Application of the proportional navigation law for guidance of autonomous underwater vehicles. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 123—133. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.016

Введение

Наведение автономного подводного аппарата (АПА) на заданный объект может рассматриваться как одна из ключевых задач при разработке систем управления его динамического позиционирования в различных постановках [1-7]. Для решения этой задачи, АПА должен быть оборудован датчиками, обеспечивающих систему управления необходимой информацией об объекте для обнаружения и сопровождения объекта,

в качестве которых широко используются видеокамеры и гидроакустические датчики. Необходимость специального изучения свойств методов наведения АПА обусловлена особенностями и ограничениями, связанными с получением и передачей сигналов этими датчиками в подводной среде и динамикой АПА, включающей нелинейные гидродинамические силы и моменты. Это исключает возможность использования только кинематической модели для решения задачи наведения. При этом известно, что пропорциональный закон навигации (ПЗН) является

одним из наиболее широко применяемых методов для наведения на цель летательных аппаратов [8, 9].

В настоящей статье предполагается, что АПА с неполным приводом, под действием силы тяги и поворотного момента, перемещается в горизонтальной плоскости. Неизвестное постоянное течение рассматривается в качестве основного возмущения подводной среды действующего на АПА. ПЗН формируется по изображениям, поступающим с видеокамеры или гидроакустического датчика, установленных на АПА, измеряя скорость изменения угла визирования объекта [3, 5, 10]. Требуется выбрать параметры системы управления, обеспечивающие его наведение на заданный объект.

Возникающие ограничения при использовании видеокамеры для определения угла визирования и оценке скорости его изменения, используя последовательность поступающих изображений, могут быть связаны с неравномерной освещенностью подводной среды, быстрым затуханием, рассеиванием и преломлением света при прохождении через неоднородную среду воздух-вода-стекло, ограничением частотного спектра проходящего света, приводящего к поглощению низкочастотных составляющих (красный, желтый) в большей степени, по сравнению со светом более высоких частот (синий, зеленый) [11]. Все это затрудняет обнаружение и видео сопровождение объекта, ограничивает дальность обнаружения объектов величиной порядка 5м и 30м при его подсветке [4] и предполагает использование специальных методов предобработки, поступающих изображений [12-14] при практической реализации ПЗН. После предобработки, обнаружение и видео сопровождение объекта (как правило, его центра) может быть выполнено с помощью стандартных процедур выделения объектов на изображениях (например, построения замкнутых контуров, сопоставления ключевых точек или предварительно обученной нейронной сети для заданных объектов [15]). Гидроакустические датчики, уступаая видеокамерам в разрешающей способности, точности и частоте съема данных, могут превосходить их по дальности обнаружения (более 3км при наведении на гидроакустические маяки [16]). При отсутствии гидроакустических маяков, для обнаружения объектов, как и в случае видео изображений, могут быть использованы методы выделения геометрической информации и нейронных сетей [17, 18]. Описанный подход может быть использован и для реализации более сложных методов наведения, включающих в качестве частных случаев метод погони и ПЗН. Это может быть, например, метод наведения, построенный на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД), рассмотренный в [5, 19]. В [4, 20] предлагается совместное использование обоих датчиков. На расстоянии более 25м от дока обрабатывается только информация, поступающая от гидроакустического датчика с удалением выбросов с помощью расширенного фильтра Калмана, при расстоянии менее 25м - используется информация только от видеокамеры [20]. В [19] приведены результаты экспериментальных исследований, наведения АПА с ПИД регулятором с использованием видеокамеры.

В работе показывается, что решение сформулированной задачи наведения АПА на заданный объект может быть сведено к анализу устойчивости нелинейной нестационарной системы с особой точкой. Развиваемый в работе подход основан на специальных определениях устойчивости решений такой системы и методе функций Ляпунова, предложенных в [21] при рассмотрении задачи наведения АПА с использованием метода погони. Получены условия устойчивости процесса наведения АПА, выполнение которых позволяет обеспечить его желаемое поведение. Приведены результаты компьютерного моделирования, включающие оценки точности наведения и сравнительный анализ использования ПЗН и метода погони.

1. Модели АПА и соотношения для ПЗН

Кинематические и динамические уравнения модели АПА в горизонтальной плоскости, учитывающие присутствие постоянного течения, могут быть получены, используя инерциальную $\{N\}$ и связанную системы $\{B\}$ координат (рисунок 1) и имеют вид [22]

$$\dot{\eta} = R(\eta)v, \quad (1)$$

$$M \dot{v}_r + C(v_r)v_r + Dv_r = \tau, \quad (2)$$

где $\eta = (x, y, \psi)^T$, x, y – координаты центра масс АПА в $\{N\}$, ψ – курсовой угол, $v = (u, v, r)^T$, u, v, r – продольная, поперечная и угловая скорости АПА в $\{B\}$, $\tau = (\tau_u, 0, \tau_r)^T$ – вектор управляющих воздействий, τ_u – сила тяги τ_r – поворотный момент, $v_r = (u - u_c, v - v_c, r)^T = (u_r, v_r, r)^T$ – скорость АПА относительно течения, $u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi)$, $v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi)$ – проекции скорости течения на продольную и поперечную оси связанной системы координат $\{B\}$, соответственно,

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix},$$

$$C(v_r) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v_r - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u_r \\ m_{22}v_r + m_{23}r & -m_{11}u_r & 0 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}, s\psi = \sin(\psi), c\psi = \cos(\psi).$$

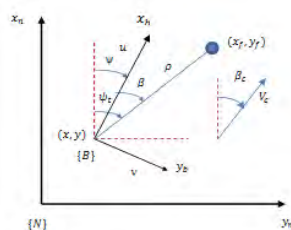


Рис. 1. Кинематика сближения

В нормальной форме Коши система уравнений (1), (2) может быть представлена в виде

$$\dot{x} = c\psi(u_r + u_c) - s\psi(v_r + v_c), \quad (3a)$$

$$\dot{y} = s\psi(u_r + u_c) + c\psi(v_r + v_c), \quad (3б)$$

$$\dot{\psi} = r, \quad (3в)$$

$$\dot{u}_r = a_u u_r + F_u + b_u \tau_u, \quad (3г)$$

$$\dot{v}_r = a_v v_r + a_{vr} r + F_v + b_v \tau_r, \quad (3д)$$

$$\dot{r} = a_r r + F_r + b_r \tau_r, \quad (3е)$$

где $a_u = \Delta / m_{11}$, $a_v = -(d_{32}m_{23} + d_{22}m_{33}) / \Delta$,

$$a_{vr} = -(d_{23}m_{33} - d_{33}m_{23}) / \Delta,$$

$$a_{rv} = (d_{22}m_{32} - d_{32}m_{22}) / \Delta,$$

$$a_r = (d_{33}m_{32} - d_{33}m_{22}) / \Delta, \quad \Delta = m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23},$$

$$F_u = c_1 r v_r + c_2 v_r^2, \quad F_v = c_3 r u_r + c_4 u_r v_r,$$

$$F_r = c_5 r u_r + c_6 u_r v_r, \quad c_1 = m_{22} / m_{11}, \quad c_2 = m_{32} / m_{11}$$

$$c_3 = (m_{22}^2 - m_{11}m_{33}) / \Delta,$$

$$c_4 = (-m_{11}m_{33} + m_{22}m_{23}) / \Delta,$$

$$c_5 = (-m_{11}m_{32} + m_{22}m_{23}) / \Delta,$$

$$c_6 = (m_{22}^2 - m_{11}m_{22}) / \Delta,$$

$$b_u = 1 / m_{11}, \quad b_v = -m_{23} / \Delta, \quad b_r = m_{22} / \Delta.$$

ПЗН действует таким образом, чтобы поворотный момент был пропорциональным скорости угла визирования, т.е.

$$\tau_r = k_r \dot{\beta}, \quad (4)$$

где k_r - положительный параметр (навигационная постоянная), обеспечивающий желаемую динамику системы.

Найдем выражение для ПЗН в декартовой системе координат, используя преобразование [23]

$$x_f - x = \rho \cos(\psi + \beta), \quad (4a)$$

$$y_f - y = \rho \sin(\psi + \beta), \quad (4б)$$

$$\rho = ((x_f - x)^2 + (y_f - y)^2)^{1/2}. \quad (4с)$$

Из рисунка 1 и уравнения (3в) следует, что

$$\tau_r = k_r(\dot{\psi}_t - \dot{\psi}) = k_r(\dot{\psi}_t - r), \quad (5)$$

где

$$\psi_t = \arctg\left(\frac{y_f - y}{x_f - x}\right). \quad (6)$$

Дифференцируя (6), находим

$$\dot{\psi}_t = \frac{1}{\rho^2} \left(y_f - y, x_f - x \right) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \frac{1}{\rho^2} \left(y_f - y, x_f - x \right) \tilde{R} \begin{pmatrix} u_r + u_c \\ v_r + v_c \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi \\ s\psi & c\psi \end{pmatrix}.$$

Подставляя (7) в (5), получаем представление для ПЗН в декартовой системе координат.

Для обеспечения желаемой продольной скорости u_d , будем использовать пропорционально-интегральный регулятор

$$\tau_u = k_{Pu}(u_d - u_r) + k_{Iu}p, \quad (8a)$$

$$\dot{p} = u_d - u_r, \quad (8б)$$

где k_{Pu} , k_{Iu} - параметры.

Соотношения (1), (2), (5), (7) и (8) образуют замкнутую систему уравнений, которые могут быть использованы для компьютерного моделирования АПА в декартовой системе координат с ПЗН.

2. Постановка задачи

С помощью замены координат (4) уравнения кинематики (1) могут быть представлены в виде

$$\dot{\rho} = -u_r c\beta - v_r s\beta - V_c c(\beta + \psi - \beta_c), \quad (9a)$$

$$\dot{\beta} = -r + \frac{u_r}{\rho} s\beta - \frac{v_r}{\rho} c\beta + \frac{V_c}{\rho} s(\beta + \psi - \beta_c), \quad (9б)$$

$$\dot{\psi} = r. \quad (9в)$$

Соотношения (9), (3г) - (3е), (4) образуют замкнутую систему уравнений в полярной системе координат, которые будут использованы для анализа поведения системы управления с ПЗН.

Из уравнения (9б) следует еще одно представление для ПЗН

$$\tau_r = \frac{k_r}{\rho} h - k_r r + \frac{k_r}{\rho} g, \quad (10)$$

где

$$h = s\beta u_r - c\beta v_r, \quad g = V_c s(\beta + \psi - \beta_c).$$

Из соотношений (7), (9б) видно, что замкнутая система управления, как в декартовой системе координат, так и в полярной имеет особую точку типа полюса в конце процесса наведения при $\rho = 0$. Это не позволяет непосредственно использовать известные определения устойчивости и методы ее анализа. Мы опираемся на подход, предложенный в [10] при использовании метода погони в качестве закона наведения, состоящий в следующем. Полагая, что АПА не пересекает точку $\rho = 0$ при $t > 0$, рассмотрим три возможных типа поведения системы для возрастающей последовательности начальных дальностей до цели $\rho_0^1 < \rho_0^2 < \dots < \rho_0^n$, ошибок по координате y и траектории движения АПА, показанные на рис. 2 - 4. В первом случае предполагается, что $V_c = 0$ и наведение завершается приведением АПА в окрестность цели. На рис. 2 показаны результаты моделирования. Видно, что с увеличением начальной дальности точность наведения увеличивается. Для второго возможного типа поведения, показанного на рис. 3, также предполагается, что $V_c = 0$. Однако видно, что с увеличением ρ_0 ошибка по y растет. И наконец, третий случай (рис. 4) показывает возможное поведение ρ и y при действии возмущений. Видно, что при увеличении ρ_0 АПА попадает в окрестность цели.

Приведенные соображения интерпретируются как асимптотическая устойчивость системы в первом случае, во втором случае – неустойчивость, в третьем – устойчивость при постоянно действующих возмущениях. Формальные определения понятия

устойчивости для рассматриваемой системы будут приведены далее.

Требуется найти условия, при которых может наблюдаться каждый из описанных типов поведения системы.

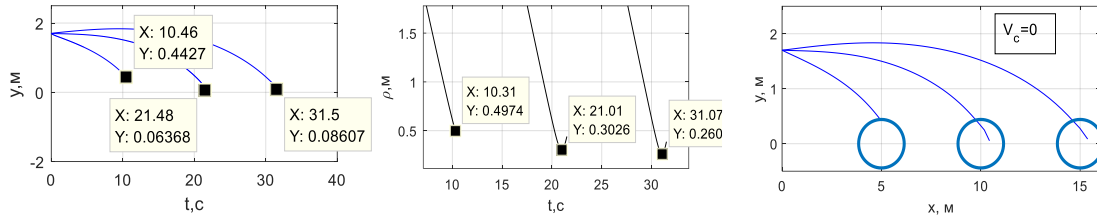


Рис.2. Зависимости ошибки по y, дальности до цели от времени и траектории движения АПА

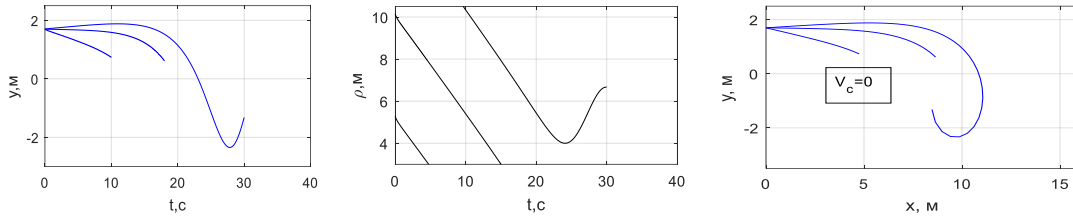


Рис. 3. Зависимости ошибки по y, дальности до цели от времени и траектории движения АПА

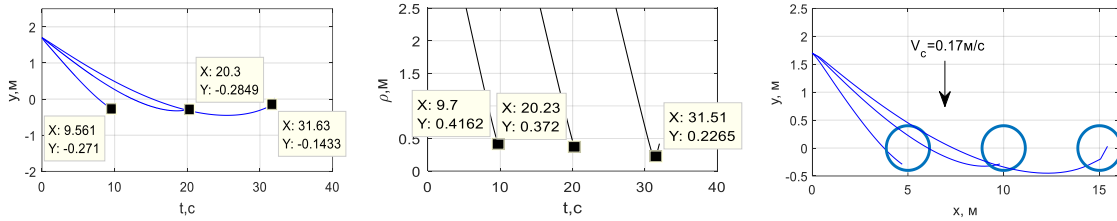


Рис. 4. Зависимости ошибки по y, дальности до цели от времени и траектории движения АПА

3. Формализация задачи и условия устойчивости

Замкнутая система уравнений в нормальной форме Коши, используя полярную систему координат, описывающая процесс наведения АПА может быть представлена в виде

$$\dot{\rho} = -u_r c \beta - v_r s \beta - V_c c (\beta + \psi - \beta_c), \quad (11a)$$

$$\dot{\beta} = -r + \frac{1}{\rho} (h + g), \quad (11б)$$

$$\dot{\psi} = r. \quad (11в)$$

$$\dot{u}_r = a_u u_r + F_u + b_u (k_{pu} (u_d - u_r) + k_{lu} \sigma), \quad (11г)$$

$$\dot{v}_r = a_v v_r + (a_{vr} - k_r) r + F_v + \frac{b_v k_r}{\rho} (h + g), \quad (11д)$$

$$\dot{r} = a_r r + F_r + \frac{b_r k_r}{\rho} (h + g), \quad (11е)$$

$$\dot{\sigma} = u_d - u_r. \quad (11ж)$$

Мы будем предполагать, что $u_d \gg V_c$. В этом случае, относительная дистанция между АПА и

целью убывает по равномерному закону и определяется выражением $\rho_t = \rho_0 - u_d t = u_d \tau$, где $\tau = t_f - t$.

Выделяя линейные члены, не включающие V_c , в правых частях системы (11) в окрестности точки $u_r = u_d$, $v_r = r = \beta = 0$ и записывая ее в отклонениях относительно этой точки, получим

$$\dot{\beta} = -r + \frac{1}{u_d \tau} (u_d \beta - v_r + \tilde{h} + g), \quad (12a)$$

$$\dot{\psi} = r, \quad (12б)$$

$$\dot{q} = (a_u - b_u k_{pu}) q + b_u k_{lu} p + F_u, \quad (12в)$$

$$\dot{v}_r = (a_v + c_3 u_d) v_r + (a_{vr} + c_4 u_d - b_v k_r) r + \tilde{F}_v + \frac{b_v k_r}{u_d \tau} (u_d \beta - v_r + \tilde{h} + g), \quad (12г)$$

$$\dot{r} = (a_r + c_5 u_d - b_r k_r) r + (a_{rv} + c_6 u_d) v_r + \tilde{F}_r + \frac{b_r k_r}{u_d \tau} (u_d \beta - v_r + \tilde{h} + n), \quad (12д)$$

$$\dot{p} = q, \quad p(0) = a_u u_d, \quad (12e)$$

где $q = u_r - u_d$, $\tilde{h}$ - разлагаются в области в окрестности точки $q = v_r = \beta = 0$ в степенные ряды по степеням, начинающиеся членами не ниже второго порядка малости,

$$\tilde{F}_v = c_3 r q + c_4 v_r q, v_r, \tilde{F}_r = c_5 r q + c_6 v_r q.$$

Система (12) представляет собой нелинейную нестационарную систему с особой точкой при $t = t_f$.

Мы интерпретируем течение задаваемое параметрами V_c , β_c , как неконтролируемое внешнее возмущение. Значения курсового угла ψ оказывает воздействие на поведение замкнутой системы (12) только через это возмущение, которое предполагается достаточно малым. Далее будет удобно рассматривать следующую обобщенную модель, заданную в векторно-матричной форме

$$\dot{\xi} = \chi z + \frac{1}{\tau}(\xi + cz) + \frac{1}{\tau} \Phi_{\xi}(\xi, z) + \frac{1}{\tau} R_{\xi}(\xi, z), \quad (13a)$$

$$\dot{z} = Az + \frac{b}{\tau}(\xi + cz) + F(z) + \frac{1}{\tau} \Phi_z(\xi, z) + \frac{1}{\tau} R_z(\xi, z), \quad (13b)$$

где ξ - скалярная функция, $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$, A - постоянная $n \times n$ матрица, χ^T, c^T, b - постоянные $n \times 1$ векторы, компоненты $\Phi_{\xi}(\xi, z)$, $\Phi_z(\xi, z)$ разлагаются в области $|\xi| + \|z\| \leq H$ в ряды по степеням ξ , $z_1, z_2, \dots, z_n$, начинающиеся членами не ниже второго порядка, $F(z) = (F_1(z), F_2(z), \dots, F_n(z))^T$, компоненты $F_i(z)$, $i = 1, 2, \dots, n$ разлагаются в области $\|z\| \leq H$ в ряды по степеням $z_1, z_2, \dots, z_n$, начинающиеся членами не ниже второго порядка, $|R_{\xi}(\xi, z)| + \|R_z(\xi, z)\| \leq \delta_1$.

Система уравнений (12) является частным случаем (13) без учета уравнения для курсового угла при

$$\xi = \beta, \quad z = (q, v_r, r, p)^T, \quad \chi = (0, 0, 1, 0),$$

$$c = (0, 1/u_d, 0), \quad b = (0, b_v k_r, b_r k_r, 0)^T,$$

$$A = \begin{pmatrix} a_u - b_u k_{pu} & 0 & 0 & b_u k_{lu} \\ 0 & a_v + c_3 u_d & a_{vr} + c_4 u_d - b_v k_r & 0 \\ 0 & a_{rv} + c_6 u_d & a_r + c_5 u_d - b_r k_r & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$F = (F_u, \tilde{F}_v, \tilde{F}_r)^T.$$

Формализуем, приведенные в предыдущем разделе типы поведения системы управления АПА в виде следующих определений устойчивости решений (13). Обозначим $x = (\xi, z^T)^T$.

Наряду с системой (13) рассмотрим систему уравнений, в которой отсутствует неконтролируемое внешнее возмущение

$$\dot{\xi} = \chi z + \frac{1}{\tau}(\xi + cz) + \frac{1}{\tau} \Phi_{\xi}(\xi, z), \quad (14a)$$

$$\dot{z} = Az + \frac{b}{\tau}(\xi + cz) + F(z) + \frac{1}{\tau} \Phi_z(\xi, z). \quad (14b)$$

Определение 1. Тривиальное решение системы (14) будем называть устойчивым, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta(\varepsilon) > 0$, что неравенство $\|x(0)\| < \delta(\varepsilon)$ влечет выполнение условия $\|x(t)\| < \varepsilon$ при $t \in [0, t_f - T_1]$ и любом $t_f > T_1$, где T_1 - произвольное фиксированное число.

Определение 2. Тривиальное решение системы (14) будем называть асимптотически устойчивым, если оно устойчиво и величина $\delta(\varepsilon)$ может быть выбрана для произвольного $\varepsilon > 0$ так, что

$$\lim_{\rho_0 \rightarrow \infty} \|x(t)\| = 0$$

при $t \in \Gamma: T_1 \leq t_f - t \leq T_2, t_f \rightarrow \infty$, где T_1, T_2 - произвольные фиксированные числа.

Определение 3. Тривиальное решение системы (14) будем называть неустойчивым, если для некоторого $\varepsilon > 0$ и любого $\delta > 0$ существует такое t^* , что $\|x(0)\| < \delta$ и $\|x(t^*)\| > \varepsilon$.

Определение 4. Тривиальное решение системы (14) будем называть устойчивым при постоянно действующих возмущениях, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta(\varepsilon) > 0$, что любое решение системы (13) для которого $\|x(0)\| < \delta(\varepsilon)$ и любых, $R_{\xi}(\xi, z)$, $R_z(\xi, z)$ удовлетворяющих условию $|R_{\xi}(\xi, z)| + \|R_z(\xi, z)\| \leq \delta$ влечёт $\|x(t)\| < \varepsilon$ при $t \in (0, t_f - T_1]$ и любом $t_f > T_1$, где T_1 - произвольное фиксированное число.

Пренебрегая членами второго порядка малости в (13) и внешним возмущением, получим нестационарную линейную систему первого приближения с особой точкой при $t = t_f$,

$$\dot{\xi} = \chi z + \frac{1}{\tau}(\xi + cz), \quad (15a)$$

$$\dot{z} = Az + \frac{b}{\tau}(\xi + cz), \quad (15b)$$

Нас будут интересовать условия, при выполнении которых из ее устойчивости или неустойчивости следует соответственно устойчивость или неустойчивость тривиального решения системы (14). Случаи, возникающие при решении этой задачи, можно подразделить на некритические, когда задача решается первым стационарным приближением

$$\dot{x} = \tilde{A}x, \quad (16)$$

где

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 0 & \chi \\ 0 & A \end{pmatrix}$$

и критические, когда рассмотрения линейного стационарного приближения недостаточно.

Перейдём непосредственно к анализу устойчивости нулевого решения системы (43).

Преобразуем (13) с помощью невырожденного преобразования

$$\theta = -\chi A^{-1}z + \xi, \quad (17)$$

полагая, что A невырожденная матрица. Система (13) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \frac{\gamma}{\tau}(\theta + c_1 z) + F_\theta(z) + \frac{1}{\tau}\tilde{\Phi}_\theta(\theta, z) + \\ &+ \frac{1}{\tau}\tilde{R}_\theta(\theta, z) \end{aligned} \quad (18a)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + \frac{b}{\tau}(\theta + c_1 z) + F(z) + \frac{1}{\tau}\tilde{\Phi}_z(\theta, z) \\ &+ \frac{1}{\tau}\tilde{R}_z(\theta, z), \end{aligned} \quad (18b)$$

где $\gamma = 1 - \chi A^{-1}b$, $c_1 = c + \chi A^{-1}$, $\tilde{\Phi}_\theta(\theta, z)$, $\tilde{R}_\theta(\theta, z)$, $\tilde{\Phi}_z(\theta, z)$, $R_z(\theta, z)$, $F_\theta(z)$ - функции того же типа, что и $\Phi_\xi(\xi, z)$, $R_\xi(\xi, z)$, $\Phi_z(\xi, z)$, $R_z(\xi, z)$, $F_i(z)$, $i = 1, 2, \dots, n$, соответственно.

Будем полагать вначале, что $\tilde{R}_\theta(\theta, z) = 0$, $R_z(\theta, z) = 0$.

Пусть дополнительно к невырожденности все собственные числа матрицы линейной стационарной части A в (18) имеют отрицательные действительные части (матрица Гурвица).

Введём функцию $V = z^T H z + \theta^2$, где матрица $H > 0$ определяется из уравнения Ляпунова [24]

$$\tilde{A}^T H + H \tilde{A} = -G, \quad G > 0. \quad (18)$$

Производная от V в силу системы (17) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} -\dot{V} &= z^T G z - 2z^T H \left[\frac{b}{\tau}(\theta + c_1 z) + F(z) + \frac{1}{\tau}\tilde{\Phi}_z(\theta, z) \right] - \\ &- 2\theta \left[\frac{\gamma}{\tau}(\theta + c_1 z) + F_\theta(z) + \frac{1}{\tau}\tilde{\Phi}_\theta(\theta, z) \right]. \end{aligned}$$

Используя формулу конечных приращений, находим

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_z(\theta, z) &= A_z(\theta, z)z + B_z(\theta, z)\theta, \\ \tilde{\Phi}_\theta(\theta, z) &= A_\theta(\theta, z)z + B_\theta(\theta, z)\theta, \end{aligned}$$

где $A_z(\theta, z)$, $B_z(\theta, z)$, $A_\theta(\theta, z)$, $B_\theta(\theta, z)$ - непрерывные функции, удовлетворяющие условиям

$$\begin{aligned} A_z(0, 0) &= 0, \quad B_z(0, 0) = 0, \\ A_\theta(0, 0) &= 0, \quad B_\theta(0, 0) = 0. \end{aligned}$$

Используя эти представления и полагая $G = 4I$, находим

$$\begin{aligned} -\dot{V} &= z^T z - \frac{\gamma}{\tau}\theta^2 + W - q_1 \frac{1}{\tau^2}\theta^2 - \\ &- q_2 \frac{1}{\tau^2}\sigma^2, \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$W = \sum_{i=1}^4 W_i, \quad (21)$$

$$W_1 = z^T z - 2z^T H F - 2\theta F_\theta - \frac{2}{\tau}z^T H B_z z, \quad (22)$$

$$W_2 = z^T z - 2b^T H \frac{\sigma}{\tau} + q_2 \frac{1}{\tau^2}\sigma^2, \quad (23)$$

$$W_3 = \tilde{W}_3 - 2z^T H A_z \theta - \frac{2}{\tau}\theta B_\theta z, \quad (24)$$

$$\tilde{W}_3 = z^T z - 2c_1 z \theta + q_1 \frac{1}{\tau^2}\theta^2, \quad (25)$$

$$W_4 = -\frac{\gamma}{\tau}\theta^2 - \frac{2}{\tau}A_\theta \theta^2, \quad (26)$$

q_1, q_2 - некоторые постоянные, $\sigma = \theta + c_1 z$.

Рассмотрим функции $W_2, \tilde{W}_3$ как квадратичные

формы переменных $z, \frac{1}{\tau}\sigma$ и $z, \frac{1}{\tau}\theta$, соответственно.

Для того, чтобы они были положительно определенными при $0 \leq t \leq t_f - T_1$

необходимо и достаточно выполнения неравенств

$$q_2 > b^T H^2 b, \quad q_1 > c_1 c_1^T. \quad (27)$$

Далее, в силу свойств функций $F, F_\theta, A_z, B_z, A_\theta, B_\theta$, при выполнении (27) и $\gamma < 0$ существует такое

$\eta > 0$, что при $z^T z + \theta^2 < \eta$, будет $W_i > 0$,

$i = 1, \dots, 4$. Откуда следует, что

$$-\dot{V} = z^T z - \frac{\gamma}{\tau}\theta^2 - q_1 \frac{1}{\tau^2}\theta^2 - q_2 \frac{1}{\tau^2}\sigma^2.$$

Учитывая неравенство $T_1 / \tau < 1$, справедливое при $0 \leq t \leq t_f - T_1$, находим

$$-\dot{V} \geq \frac{\alpha_1}{\tau}(z^T z + \theta^2) - q_1 \frac{1}{\tau^2}\theta^2 - q_2 \frac{1}{\tau^2}\sigma^2 \geq$$

$$-\dot{V} \geq \frac{1}{\tau}(\alpha_1 - \frac{\alpha_2}{\tau})(z^T z + \theta^2),$$

где $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_1 = \min\{T_1, -\gamma\}$.

Используя оценки для V

$$\lambda_1(z^T z + \theta^2) \leq V \leq \lambda_2(z^T z + \theta^2), \quad (28)$$

где λ_1, λ_2 – минимальное и максимальное, соответственно, собственные числа матрицы квадратичной формы V , получаем

$$\dot{V} \leq \frac{1}{\tau}(-\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{\tau})V, \quad \alpha_3 > 0, \quad \alpha_4 > 0.$$

Интегрируя это неравенство и учитывая, что преобразование (14) невырожденное, находим

$$z^T z + \theta^2 \leq \alpha_0(z_0^T z_0 + \xi_0^2) e^{-\alpha \tau}, \quad (29)$$

где $\alpha_0 > 0, \alpha > 0$. Из (29) следует, что $z^T z + \theta^2 \leq \alpha_0(z_0^T z_0 + \xi_0^2)$. Выбор δ из условия $\alpha_0 \alpha_0(z_0^T z_0 + \xi_0^2) < \varepsilon$ приводит к неравенству $z^T z + \theta^2 \leq \varepsilon$, которое будет выполняться для любых $0 \leq t \leq t_f - T_1, t_f > T_1$ в достаточно малой окрестности положения равновесия.

Покажем, что если $\gamma > 0$, то нулевое решение системы (14) неустойчиво. Введём функцию $V = -z^T H z + \theta^2$, где матрица $H > 0$ определяется из уравнения Ляпунова (18). Производная от V в силу системы (14) приводится к виду

$$\dot{V} = z^T z + \frac{\gamma}{\tau} \theta^2 + W - q_1 \frac{1}{\tau^2} \theta^2 - q_2 \frac{1}{\tau^2} \sigma^2,$$

где W определяется выражениями (21) - (26). Откуда при выполнении (27) следует, что $W > 0$ и

$$\begin{aligned} \dot{V} &\geq z^T z + \frac{\gamma}{\tau} \theta^2 - q_1 \frac{1}{\tau^2} \theta^2 - q_2 \frac{1}{\tau^2} \sigma^2 \geq \\ &\geq \frac{\alpha_1}{\tau} (z^T z + \theta^2) - q_1 \frac{1}{\tau^2} \theta^2 - q_2 \frac{1}{\tau^2} \sigma^2, \end{aligned}$$

где $\alpha_1 = \min\{T_1, \gamma\}$. Так как $V \leq \lambda_2(z^T z + \theta^2)$, $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \lambda_2 > 0$, то

$$\dot{V} \geq \frac{\alpha_2}{\tau} V + \frac{1}{\tau} (\alpha_1 / 2 - \frac{\alpha_3}{\tau}) (z^T z + \theta^2) \geq \frac{\alpha_2}{\tau} V$$

при $t < t_f - 2\alpha_3 / \alpha_1$ в достаточно малой окрестности положения равновесия, где $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$. Интегрируя это неравенство с начальным условием, взятым из произвольно малой окрестности начала координат получим

$$\lambda_1(z^T z + \theta^2) \geq V_0 t^{\alpha_2} \tau^{-\alpha_2}.$$

Т.е. функция V растёт неограниченно и при достаточно большом t_f точка $x = (\theta, z^T)^T$ выйдет за пределы области $\{x: \|x\| \leq \varepsilon\}$.

Пусть матрица линейной стационарной части системы (14) $\tilde{A}$ имеет хотя бы одно собственное

число с положительной действительной частью. Представим (14) в следующей обобщенной форме

$$\dot{x} = (\tilde{A} + \frac{1}{\tau} B)x + \tilde{F}(x) + \frac{1}{\tau} \Phi(x), \quad (30)$$

где $x = (\xi, z^T)^T$, B - произвольная постоянная матрица, компоненты $\tilde{F}(x)$, $\Phi(x)$ разлагаются в области $\|x\| \leq H$ в ряды по степеням $x_1, x_2, \dots, x_n$, начинающиеся членами не ниже второго порядка малости. При сделанных предположениях, нулевое решение этой системы будет неустойчивым. Доказательство этого утверждения проводится по той же схеме, что и в работе [10] при анализе неустойчивости системы управления, используя метод погони, и мы его опускаем.

Рассмотрим устойчивость системы (18) при постоянно действующих возмущениях. Будем полагать, что $\tilde{R}_\theta(\theta, z) \neq 0, R_z(\theta, z) \neq 0, A$ - Гурвица матрица и $\gamma < 0$. Введём функцию $V = z^T H z + \theta^2$, где матрица $H > 0$ определяется из уравнения Ляпунова (18). Производная от V в силу системы (18) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} -\dot{V} &= z^T z - \frac{\gamma}{\tau} \theta^2 + W - q_1 \frac{1}{\tau^2} \theta^2 - \\ &- q_2 \frac{1}{\tau^2} \sigma^2 - \frac{2}{\tau} z^T H \tilde{R}_z(\theta, z) - \frac{2}{\tau} \theta \tilde{R}_z(\theta, z). \end{aligned}$$

Откуда, при выполнении (27), следует неравенство

$$\dot{V} \leq \frac{1}{\tau}(-\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{\tau})V - \frac{1}{\tau} b(t), \quad \alpha_3 > 0, \quad \alpha_4 > 0, \quad (31)$$

где $b(t) = 2z^T H \tilde{R}_z(\theta, z) + 2\theta \tilde{R}_z(\theta, z)$.

Вводя замену $\rho = V^{1/2}$, преобразуем (31) к виду

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= V^{-1/2} \dot{V} / 2 \leq \\ &\leq V^{-1/2} \frac{1}{\tau}(-\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{\tau})V / 2 + \frac{\alpha_5}{\tau} V^{-1/2} f(t) \|x\| = \\ &= \frac{1}{\tau}(-\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{\tau})\rho / 2 + \frac{\alpha_5 f(t) \|x\|}{\tau \rho}, \end{aligned}$$

где $\alpha_3 > 0, \alpha_4 > 0, \alpha_5 > 0$ – постоянные, $f(t) = \|\tilde{R}_z(\theta, z)\| + |\tilde{R}_\theta(\theta, z)|, x = (\theta, z^T)^T$.

Так как $\|x\| \rho^{-1/2} \leq \lambda_1^{-1/2}$, где

λ_1 – минимальное собственное число матрицы H , то

$$\dot{\rho} \leq \frac{1}{\tau}(-\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{\tau})\rho / 2 + \frac{\alpha_5 \lambda_1^{-1/2} f(t)}{\tau}.$$

Интегрируя это неравенство, получаем оценку

$$\|x\| \leq \alpha_0 \|x_0\| + \alpha_6 \delta(\varepsilon),$$

где α_6 – положительная постоянная. Выбор δ , обеспечивающего выполнение условий $\alpha_0 \|x_0\| < \varepsilon/2$, $\alpha_6 \delta(\varepsilon) < \varepsilon/2$ приводит к неравенству $\|x\| \leq \varepsilon$, которое будет выполняться для любых $0 \leq t \leq t_f - T_1$, $t_f - T$.

Таким образом, доказано следующее утверждение.

Теорема. 1. Если матрица $\tilde{A}$ Гурвица и выполняется условие

$$\gamma = 1 - \chi A^{-1} b < 0, \quad (31)$$

где $\chi = (0, 0, 1, 0)$, то нулевое решение системы (14) асимптотически устойчиво и устойчиво при постоянно действующих возмущениях.

2. Если среди собственных чисел матрицы $\tilde{A}$ имеется хотя бы одно с положительной действительной частью или $\gamma > 0$ то нулевое решение (14) неустойчиво.

4. Компьютерное моделирование

Для иллюстрации предложенного подхода, в статье, использовалась модель АПА торпедообразного типа [7]. Параметры модели и управлений приведены в табл. 1.

На рисунке 5 показаны зависимости минимального значения λ действительных частей собственных чисел матрицы $\tilde{A}$ и величины γ от k_r для двух продольных скоростей: 0.5, 1.0 м/с, позволяющие выбрать их значение из условия устойчивости ($\lambda < 0, \gamma < 0$). Отметим следующее.

Во-первых, выбор навигационного параметра k_r может приводить как к устойчивости, так и неустойчивости замкнутой системы. Во-вторых, видно, что увеличение k_r приводит к увеличению абсолютного значения λ и уменьшению γ . Таким образом, в процессе моделирования должен быть обеспечен компромисс в выборе этих параметров, обеспечивающих необходимое быстродействие. В третьих, при увеличении величины желаемой продольной скорости необходимо одновременно увеличивать k_r .

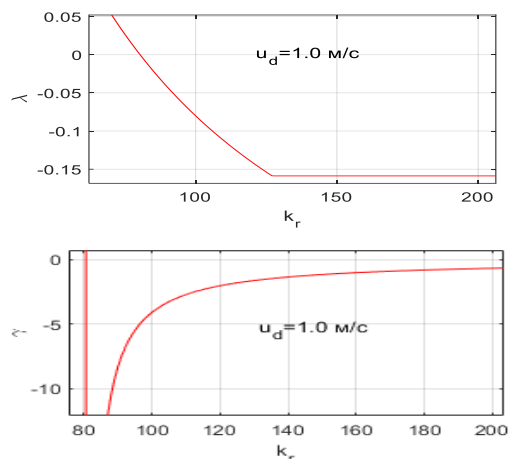
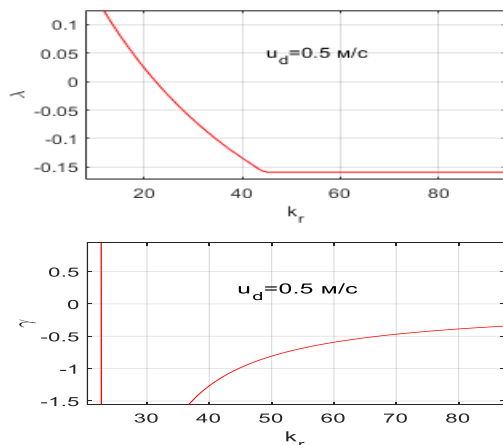


Рис. 5 – Зависимости минимального значения действительных частей собственных чисел матрицы $\tilde{A}$ и γ от k_r для различных продольных скоростей

Используя графики, приведенные на рис.5 для $u_d = 0.5$ м/с, покажем, что выбор навигационного параметра k_r в (3) может приводить как к устойчивости, так и неустойчивости замкнутой системы. На рис. 2 показано поведение устойчивой системы при $k_r = 50$, а на рис. 3 – неустойчивой при $k_r = 8$. Рис. 4 иллюстрирует поведение при $k_r = 50$ устойчивой системы в присутствии течения. Дополним графики, приведенные на этом рисунке, графиками зависимостей ψ , u_r , v_r , r от времени (рис.6).

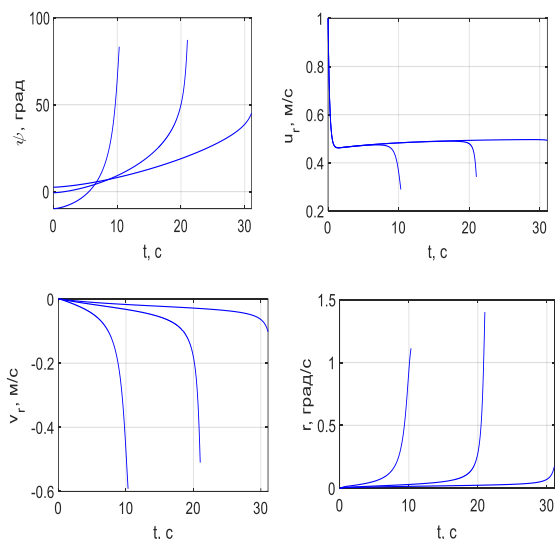


Рис. 6 - Зависимости компонент состояния системы от времени

На рисунке 7 показаны траектории движения АПА при $u_d = 0.5$ м/с, $V_c = 0.25$ м/с с использованием метода погони и ПЗН (кривые синего и красного цвета, соответственно). Видно, что метод погони приводит к менее гладким траекториям, которые могут либо не попадать в круг радиуса 0.5м, либо попадать с частичным его обходом. Навигационные

параметры в каждом из методов выбирались из соображений устойчивости. Для метода погони процедура выбора описана в предыдущем разделе, а для ПЗН мы полагали $k_r = 60$, используя кривые, показанные на рисунке 5.

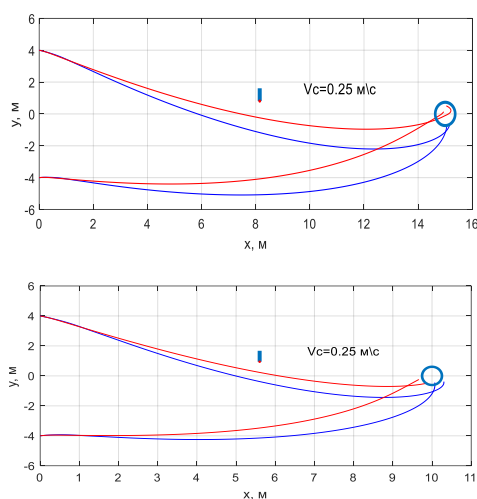


Рис. 7– Траектории движения АПА

Таблица 1

Модель АПА	$m_{11} = 47.5, m_{22} = 94.1,$ $m_{33} = 13.6, m_{23} = 5.2, m_{32} = 5.2$
Регулятор	$k_{pu} = 200, k_{fu} = 20, k_{\psi} = 150$ и $u_d = 0.5$ м/с
Начальные условия	$x_0 = 0$ м, $y_0 = 2$ м, $x_f = [5, 10, 15]$ м, $y_f = 0, \beta_0 = \pi/6 = 0.524$ рад = 30° , $\psi_0 = 0.656$ рад = 37.6° , $u_{r0} = 1$ м/с, $v_{r0} = 0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
Течение	$V_c = 0.1$ м/с, $\beta_c = -\pi/3$ рад

Заключение

Рассмотрена задача управления сближением АПА с заданным объектом по оценке скорости изменения угла визирования с помощью изображений поступающих с видеокамеры или гидроакустического датчика. Предложенный в работе подход, позволяет выбрать на этапе проектирования опытного образца параметры модели АПА и системы управления, обеспечивающие стремление к нулю ошибки начального позиционирования и ее ограниченности при действии неконтролируемого подводного течения с увеличением интервала управления.

Отметим следующее:

1. Результаты компьютерного моделирования показали, что при выборе параметров замкнутой системы из условий устойчивости, во всех рассмотренных случаях, АПА попадал в окрестность цели – круг радиус, которого не превышает 0.5 м.

2. По мере приближения к цели, амплитуды значений компонент состояния ψ , v_r , i растут. Мы объясняем это действием течения на АПА. Для уменьшения этого эффекта закон управления может корректироваться введением дополнительных составляющих частично компенсирующих влияние течений или методов теории фильтрации.

3. ПЗН может обеспечить меньшие перегрузки в процессе наведения по сравнению с методом погони.

4. Показано, что решение задачи наведения с ПЗН может быть сведено к анализу устойчивости нелинейной нестационарной системы с особой точкой. Развиваемый в работе подход основан на методе функций Ляпунова, предложенный в [10] для метода погони. Показано, что ПЗН приводит к значительно более сложным уравнениям замкнутой системы по сравнению с методом погони. Так при анализе ее устойчивости необходимо использовать нестационарное линейное приближение.

Литература

1. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Костенко В.В., Павин А.М. Модели, системы и технологии подводных роботов и их применение для решения поисково-обследовательских задач. Тр. XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва. 2019. – С. 3271-3278.
2. Bellingham J., "Autonomous underwater vehicle docking," Springer Handbook of Ocean Engineering, Cham: Springer International Publishing, pp. 387–406, 2016.
3. Li B., Xu Y., Liu Ch., Sh. Fan, Xu W. "Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle," IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pp. 25-30, 2015.
4. Maki T., Shiroku R., Sato S., Matsuda T., Sakamaki T., and Ura T., Docking method for hovering type AUVs by acoustic and visual positioning, In: 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), Tokyo, Japan, 5–8 March, pp. 1–6, 2013.
5. Burdinsky N. Guidance algorithm for an autonomous unmanned underwater vehicle to a given target. Optoelectronics Instrumentation and Data Processing vol. 48, no. 1, pp. 69-74, 2012.
6. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents, International Journal of Control. 80(7): 1092-1108, 2007.
7. Zaopeng D., Wan L., Wan L., Li Y. Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents, July International Journal of Advanced Robotic Systems 12(7):1, 2015.
8. Казаков, И. Е., Мишаков А. Ф. Авиационные управляемые ракеты. Ч.2. Системы управления и динамика наведения управляемых ракет и бомб / И. Е. Казаков, А. Ф. Мишаков; под ред. И. Е. Казакова. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1985. – 423 с.
9. Shneydor N., Missile Guidance and Pursuit, Kinematics Dynamics and Control, Woodhead Publishing, 1998.
10. Canjun Y., Shilin P., Shuangshuang F., Shaoyong Z., Pinfu W., Ying C. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents. Ocean Engineering 125 (2016) 170 – 181.
11. Bonin, F., Burguera, A. & Oliver, G. Imaging Systems for Advanced Underwater Vehicles. Journal of Maritime Research, VIII(1), pp. 65-86, 2011.

12. Sahu P., Gupta N., Sharma N. A Survey on Underwater Image Enhancement Techniques International Journal of Computer Applications, Volume 87 – No.13, February 2014.
13. Скороход Б.А., Стаценко А.В., Фатеев С.И. Предобработка и алгоритмы выбора ключевых точек в задаче одновременной 3d реконструкции подводных объектов и построения траектории движения камеры. "Системы контроля окружающей среды", Выпуск 2 (36), Год: 2019, С. 30-37.
14. Skorohod B.A., Statsenko, A.V., Fateev S.I., Zhilyakov P.V. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot October 2019, Journal of Physics Conference Series 1333(4):042030.
15. Singh P., Gregson E., Ross J., Seto M., Kaminski C. and Hopkin D. "Vision-Based AUV Docking to an Underway Dock using Convolutional Neural Networks," 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. Johns, NL, Canada, 2020, pp. 1-6.
16. Allen B., Autstin T., Forrester N., Goldsborough R., Kululya A., Packard G., Purcell M. and Stokey R. "Autonomous Docking Demonstrations with Enhanced REMUS Technology," OCEANS 2006. MTS/IEEE, 18-21 Sept. 2006, pp. 1-6.
17. Hurts N., Ribas D., Cufi X., Petillot Y. and Salvi J. "Fourierbased Registration for Robust Forwardlooking Sonar Mosaicing in Lowvisibility Underwater Environments", Journal of Field Robotics 32.1 (2015): 123-151. 2015.
18. Kim B., Yu S., "Imaging sonar based real-time underwater object detection utilizing AdaBoost method," 2017 IEEE Underwater Technology (UT), Busan, Korea (South), 2017, pp. 1-5.
19. Li B., Xu Y., Liu C., Fan S., Xu W. "Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle," 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Shenyang, China, 2015, pp. 25-30
20. Fan, S., Liu, C., Li, B. et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance. J Mar Sci Technol **24**, 673–685 (2019).
21. Скороход Б.А., Жиликов П.В. Устойчивость системы наведения автономных подводных аппаратов в присутствии подводных течений, Морские интеллектуальные технологии, № 3, часть 1, С.70-79. 2023г.
22. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, 2011.
23. Aicardi M., G. Casalino. Bicchi A. and Balestrino A., "Closed loop steering of unicycle-like vehicles via Lyapunov techniques", IEEE Rob. & Autom. Mag. , 2, pp. 27–35, 1995.
24. Малкин И.Г. Теория устойчивости, М.—Л. , Гостехиздат, 1952, 431 стр.

References

1. Kiselev L.V., Inzarcev A.V., Kostenko V.V., Pavin A.M. Modeli, sistemy i tekhnologii podvodnyh robotov i ih primeneniye dlya resheniya poiskovo-obsledovatel'skikh zadach [Models, systems and technologies of underwater robots and their application for solving search and survey tasks]. Tr.XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019, Moskva. 2019.—S.3271-3278. (in Russian)
2. Bellingham J., "Autonomous underwater vehicle docking," Springer Handbook of Ocean Engineering, Cham: Springer International Publishing, pp. 387–406, 2016.
3. Li B., Xu Y., Liu Ch., Sh. Fan, Xu W. "erminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle, IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pp. 25-30, 2015.
4. Maki T, Shiroku R., Sato S., Matsuda T., Sakamaki T., and Ura T., Docking method for hovering type AUVs by acoustic and visual positioning, In: 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), Tokyo, Japan, 5–8 March, pp. 1–6, 2013.
5. Burdinsky N. Guidance algorithm for an autonomous unmanned underwater vehicle to a given target. Optoelectronics Instrumentation and Data Processing vol. 48, no. 1, pp. 69-74, 2012.
6. Agular A.P., Pascoal A.M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents, International Journal of Control. 80(7): 1092-1108, 2007.
7. Zaopeng D., Wan L., Wan L., Li Y. Point Stabilization for an Underactuated AUV in the Presence of Ocean Currents, July International Journal of Advanced Robotic Systems 12(7):1, 2015.
8. Kazakov, I. E., Mishakov A. F. Aviacionnye upravlyaemye rakety. Ch.2. Sistemy upravleniya i dinamika na-vedeniya upravlyaemyh raket i bomb / I. E. Kazakov, A. F. Mishakov; pod red. I. E. Kazakova. – M.: VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 1985. – 423 s.
9. Shneydor N., Missile Guidance and Pursuit, Kinematics Dynamics and Control, Woodhead Publishing, 1998.
10. Canjun Y., Shilin P., Shuangshuang F. , Shaoyong Z., Pinfu W., Ying C. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents. Ocean Engineering 125 (2016) 170 – 181.
11. Bonin, F., Burguera, A. & Oliver, G. Imaging Systems for Advanced Underwater Vehicles. Journal of Maritime Research, VIII(1), pp. 65-86, 2011.
12. Sahu P., Gupta N., Sharma N. A Survey on Underwater Image Enhancement Techniques International Journal of Computer Applications, Volume 87 – No.13, February 2014.
13. Skorohod B.A., Stacencko A.V., Fateev S.I. Predobrabotka i algoritmy vybora ključevykh točhek v zadache odnovennoy 3d rekonstrukcii podvodnykh ob#ektov i postroeniya traektorii dvizheniya kamery. "Sistemy kontrolja okružhajushhej sredy", Vypusk 2 (36), God: 2019, S. 30-37.
14. Skorohod B.A., Statsenko, A.V., Fateev S.I., Zhilyakov P.V. Accuracy analysis of 3D points reconstructed from workspace of underwater robot October 2019, Journal of Physics Conference Series 1333(4):042030.
15. Singh P., Gregson E., Ross J., Seto M., Kaminski C. and Hopkin D. "Vision-Based AUV Docking to an Underway Dock using Convolutional Neural Networks," 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. Johns, NL, Canada, 2020, pp. 1-6.

16. Allen B., Autstin T., Forrester N., Goldsborough R., Kululya A., Packard G., Purcell M. and Stokey R. "Autonomous Docking Demonstrations with Enhanced REMUS Technology," OCEANS 2006. MTS/IEEE, 18-21 Sept. 2006, pp. 1-6.
17. Hurts N., Ribas D., Cufi X., Petillot Y. and Salvi J. "Fourierbased Registration for Robust Forwardlooking Sonar Mosaicing in Lowvisibility Underwater Environments", Journal of Field Robotics 32.1 (2015): 123-151. 2015.
18. Kim B., Yu S., "Imaging sonar based real-time underwater object detection utilizing AdaBoost method," 2017 IEEE Underwater Technology (UT), Busan, Korea (South), 2017, pp. 1-5.
19. Li B., Xu Y., Liu C., Fan S., Xu W. "Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle," 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Shenyang, China, 2015, pp. 25-30
20. Fan, S., Liu, C., Li, B. et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance. J Mar Sci Technol **24**, 673–685 (2019).
21. Skorohod B.A., Zhiljakov P.V. Ustojchivost' sistemy navedenija avtonomnyh podvodnyh apparatov v prisutstvii podvodnyh techenij» prinjata k opublikovaniju v № 3 chast' 1 2023g., «Morskie intellektual'nye tehnologii».
22. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, 2011.
23. Aicardi M., G. Casalino. Bicchi A. and Balestrino A., "Closed loop steering of unicycle-like vehicles via Lyapunov techniques", IEEE Rob. & Autom. Mag. , 2, pp. 27–35, 1995.
24. Malkin I.G. Teoriya ustojchivosti [Stability theory], M.—L., Gostekhizdat, 1952, 431 str. (in Russian)

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Скороход Борис Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 Университетская ул., 33, e-mail: boris.skorohod@mail.ru

Boris A. Skorohod, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of informatics and control in technical systems, Sevastopol State University, 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 Universitetskaya str., 33, e-mail: boris.skorohod@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 15.09.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 23.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 24.10.2023.

Научная статья

УДК 504.062

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.017>

Развитие концепции интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути

Малыгин И.Г.¹ malygin_com@mail.ru, Коновалов И.Н.¹ info@iptran.ru, Королев О.А.¹ korolev@iptran.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В данной статье исследуется перспектива развития представленной в предшествующих публикациях концепции Интеллектуальной системы экологической безопасности (ИСЭБ) с учетом последних достижений в области новых интеллектуальных и сетевых технологий и актуальной оценки текущего контекста, связанного с развитием Северного морского пути (СМП) и его использованием. Авторы статьи провели аналитическое исследование перспективных технологических инноваций, которые способны усовершенствовать и оптимизировать функциональность ИСЭБ. Эти усовершенствования направлены на усиление системной способности к интеграции с государственными интеллектуальными системами других профилей, расширение возможностей системы в области стратегического планирования деятельности СМП, прогнозирования и анализа экологических рисков, разработки методов и подходов для их минимизации, а также выработки стратегий реагирования на изменения показателей мониторинга и возможные чрезвычайные события и катастрофы различного характера. Кроме того, статья затрагивает вопросы построения сетей экологических зондов. Дополнительно в работе проведена систематизация потенциальных экологических вызовов, связанных с дальнейшим развитием Северного морского пути и ассоциированными территориями Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ).

Ключевые слова: экология, безопасность, транспорт, мультимодальная система, управление, мониторинг, прогноз, моделирование, контроль.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН №075-01352-23-0 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 13.01.2023 №075-03-2023-431)

Для цитирования: Малыгин И.Г., Коновалов И.Н., Королев О.А. Развитие концепции интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 134—142. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.017

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.017>

Development of the concept of an intelligent system of environmental safety of the Northern Sea Route

Igor G. Malygin¹ malygin_com@mail.ru, Ivan N. Kononov¹ info@iptran.ru, Oleg A. Korolev¹ korolev@iptran.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences

Abstract. This article examines the prospects for the development of the concept of an Intelligent Environmental Safety System (ISEB) presented in previous publications, taking into account the latest achievements in the field of new intelligent and network technologies and an up-to-date assessment of the current context associated with the development of the Northern Sea Route (NSR) and its use. The authors of the article conducted an analytical study of promising technological innovations that can improve and optimize the functionality of the ISEB. These improvements are aimed at strengthening the system's ability to integrate with state intellectual systems of other profiles, expanding the system's capabilities in the field of strategic planning of the activities of the NSR, forecasting and analyzing environmental risks, developing methods and approaches to minimize them, as well as developing strategies to respond to changes in monitoring indicators and possible emergency events and disasters of various nature. In addition, the article touches on the issues of building networks of environmental probes. Additionally, the work systematizes potential environmental challenges associated with the further development of the Northern Sea Route and associated territories of the Arctic zone of the Russian Federation (AZ RF).

Key words: ecology, safety, transport, multimodal system, management, monitoring, forecast, modeling, control.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-01352-23-0 for 2023 and for the planned period of 2024 and 2025 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 13 January 2023 № 075-03-2023-431)

For citation: Malygin I.G., Kononov I.N., Korolev O.A. Development of the concept of an intelligent system of environmental safety of the Northern Sea Route // Marine Intelligent Technologies. 2023. № 4 part 1, P. 134—142. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.017

Введение

В современных условиях в связи с прогрессирующими изменениями климата и изменением геополитических векторов, развитие Северного морского пути (СМП) приобретает все большее значение. Несомненно, этот процесс открывает перспективы для экономического роста, однако с ним также сопряжены значительные экологические вызовы, которые требуют всестороннего изучения и внимания.

Цель данной статьи заключается в дальнейшем развитии концепции Интеллектуальной системы экологической безопасности (ИСЭБ) для СМП, ранее описанной в наших публикациях [1-4]. Эта система нацелена на повышение экологической устойчивости СМП и на снижение негативного воздействия транспортной деятельности на уникальную арктическую экосистему. Разработка такой системы становится более актуальной и важной задачей, поскольку обеспечение экологической безопасности в арктическом регионе является неотъемлемым условием для устойчивого развития СМП.

В данной работе рассмотрены существующие экологические проблемы, связанные с развитием СМП, а также представлены технологические решения, созданные для мониторинга и обеспечения экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации (АЗ РФ).

Рассматриваемая концепция ИСЭБ основана на анализе экологических параметров, сборе и обработке данных о состоянии окружающей среды в АЗ РФ, а также на использовании современных моделей и алгоритмов для прогнозирования и мониторинга экологической ситуации. Планируется интеграции разрабатываемой системы с уже существующими технологиями и объектами инфраструктуры Арктического региона и СМП, что позволит более эффективно контролировать и управлять экологическими аспектами транспортной деятельности.

Результаты нашего исследования могут послужить основой для принятия решений и разработки мер, направленных на обеспечение экологической безопасности АЗ РФ и СМП, в частности. В будущем, возможно проведение более глубоких исследований в данной области с целью усовершенствования и расширения разработанной Интеллектуальной системы экологической безопасности.

Экологические проблемы Арктического региона и СМП и их технологические решения

Роль Северного морского пути в контексте экономики и развития АЗ РФ имеет фундаментальное значение. Существующие исследования подчеркивают, что расширение и усовершенствование транспортного коридора в Российской Арктике, включая СМП, предоставляет перспективы более эффективной и экономически выгодной транспортировки товаров между Азией, Европой и Северной Америкой [1]. Однако, учитывая важные изменения в климате и улучшение возможностей судоходства в АЗ РФ, возникает необходимость в комплексном подходе к

совершенствованию управления и обеспечению экологической безопасности СМП.

Ранее проведенные научные исследования [1-4] подробно рассматривали экологические аспекты, связанные с развитием СМП. Одна из ключевых проблем заключается в потенциальном воздействии транспортной активности на уникальные арктические экосистемы. Различные исследования подтверждают, что увеличение судоходства в Арктике может создать повышенный риск для морской фауны, включая морских млекопитающих и птиц, а также представляет угрозу загрязнению окружающей среды нефтепродуктами и другими опасными веществами. В частности, статьи [5, 6] подробно описывают связь между изменением уровня воды и возможностью сейсмических явлений различного уровня опасности, подчеркивая важность геодезического мониторинга и предоставляя разнообразные методы его осуществления. Специалисты из Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) разработали методику статистического моделирования переноса воздуха, чтобы изучить потенциальное воздействие на климат в Арктике дымовых эффектов техногенных катастроф и выбросов пепла при извержениях вулканов.

Статья [7] рассматривает варианты транспортировки грузов повышенной опасности по СМП и связанные с этим риски. Авторы подчеркивают значимость разработки и внедрения интеллектуальных систем экологической безопасности и навигационного сопровождения транспортировки, а также учитывают важные факторы, такие как конструкция транспортных контейнеров, технологии погрузки и разгрузки, чтобы обеспечить безопасное и эффективное транспортирование разнообразных номенклатур грузовой базы, включая особо опасные грузы. Развитие активного использования СМП, совместно с климатическими изменениями, может привести к уменьшению ледового покрова Арктики, что, как показано в исследовании [8], может оказать негативное воздействие на популяции морской и прибрежной фауны.

В целях обеспечения экологической безопасности в АЗ РФ, были разработаны и изучены различные технологические решения. Один из примеров — это использование дистанционного зондирования Земли и спутниковых систем мониторинга для отслеживания состояния льдов и выявления проблемных областей. Также были предложены методы моделирования и прогнозирования экологической ситуации в арктическом регионе с помощью компьютерных моделей и алгоритмов.

Однако, несмотря на имеющиеся исследования, посвященные экологической безопасности Арктики и СМП, существует необходимость в разработке инновационных интеллектуальных и автоматизированных систем, способных эффективно управлять экологическими аспектами данной транспортной инфраструктуры, оценивать риски изменений окружающей среды и прогнозировать возможные последствия таких изменений.



На рисунке: 1 – спутники дистанционного зондирования Земли, 2 – суда, движущиеся по СМП и оборудованные аппаратурой ИСЭБ, 3 – стационарные подводные зонды, 4 – пункты геодезического мониторинга и биоиндикации, 5 – стационарные объекты инфраструктуры ИСЭБ, 6 – условно стационарные аэростаты, 7 – крупные транспортно-логистические узлы.

Рис. 1. Иллюстрация структурных связей между подсистемами ИСЭБ

Развитие концепции ИСЭБ

В развитии концепции Интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути имеются важные аспекты, описанные в работах [1-4, 9], где рассматриваются принципы построения и структура данной системы. Эта концепция базируется на существующей транспортной инфраструктуре АЗ РФ. Однако, в данной статье предлагается расширить концепцию создания ИСЭБ СМП путем внесения нескольких дополнительных элементов, которые, по мнению авторов, требуются в свете необходимости мониторинга большого объема экологических показателей и физических параметров окружающей среды. В данном разделе предоставляется обоснование для внесения указанных дополнений и предлагаются варианты их практической реализации.

Сбор и обработка данных

Одной из ключевых задач проектирования ИСЭБ является определение источников данных о состоянии окружающей среды в арктическом регионе, включая данные о льдах, температуре воды, океанографических параметрах и экосистемах.

Контроль качества воздуха требует оценки содержания различных соединений, таких как диоксид серы (SO_2), диоксид азота (NO_2), углекислый газ (CO_2), бензол (C_6H_6), толуол (C_7H_8), формальдегид (HCHO), сероводород (H_2S), аммиак

(NH_3), озон (O_3), свинец (Pb), мышьяк (As), а также взвеси твердых частиц (PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$), как определено в СанПиН 2.1.3684-21 [10] и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [11] СанПиН 1.2.3685-21 [12]

Контроль качества воды, в свою очередь, включает в себя измерение температуры воды, чтобы оценить ее тепловой режим, влияющий на растворимость веществ и жизненные процессы организмов. Элементы, такие как уровень pH, электропроводность воды и турбидность, служат для определения степени мутности воды и выявления загрязнений. Контроль также включает анализ содержания в воде тяжелых металлов, пестицидов, гербицидов, продуктов нефтепереработки, а также наличия бактериальных и органических загрязнений, которые могут оказывать воздействие на живые организмы и соответствует нормативам таким как ГН 2.1.5.689-98 "Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования" [13] и СанПиН 2.1.3684-21 [10].

На основе вышеизложенного, для достижения более высокого уровня мониторинга и повышения качества прогнозирования экологической обстановки, предполагается проводить замеры и взятие проб по указанным нормативным параметрам не только приборами, установленными на судах, которые можно рассматривать как мобильные элементы ИСЭБ, как описано в [9], но также приборами-зондами, развернутыми в стационарной сети на всей протяженности СМП. Это предложение

является одним из дополнений к структуре ИСЭБ, рассмотренной в [1, 2, 4, 7, 9]

Методы и инструменты для сбора и обработки данных

Задачей стоящей при развертывании ИСЭБ СМП является разработка методов и инструментов для сбора и обработки данных, включая использование дистанционного зондирования Земли, спутниковых систем мониторинга, сетей датчиков и исполнительных устройств.

Геодезический мониторинг. Для осуществления эффективного геодезического мониторинга требуется выявление значимых изменений состояний объекта, что возможно с помощью сети геодезических пунктов, как показано в работе [5], расположенных на побережье по всей протяженности СМП (рис.1). Требуется проведение детальной оценки необходимого количества пунктов, и исходя из этого определение возможных способов связи между ними и варианты их интеграции в систему ИСЭБ. В статье [6] предлагается один из вариантов реализации пунктов геодезического мониторинга с применением малобюджетной телеметрической аппаратуры оснащенной навигационным модулем и компактной антенной, результаты проведенных экспериментов показали, что определение координат с помощью малобюджетной аппаратуры может быть обеспечено с погрешностями на уровне нескольких сантиметров как относительным методом, так и методом PPP (Precise Point Positioning) при условии достаточно точного учета влияния ионосферной задержки. Что позволяет получить приемлемый уровень точности для достоверного анализа сейсмической ситуации.

Биомониторинг и биоиндикация. Одним из методов получения информации о состоянии экологических систем территории является биомониторинг, позволяющий путем систематического контроля состояния выбранного вида флоры или фауны, распространённого в изучаемой области, оценить степень влияния тех или иных факторов на экологию.

Как было показано в статье [7] мультимодальная транспортировка опасных грузов влечет несколько различных потенциально опасных факторов, одним из которых является процесс погрузки-выгрузки грузов. С точки зрения экологического мониторинга, этот процесс может нести угрозу не только в тех случаях, когда речь идет об опасных грузах, а также о грузах, выделяющих при процессах погрузки-выгрузки взвеси мелкодисперсных частиц, способных перемещаться под воздействием воздушных и тепловых потоков на значительные расстояния, оказывая негативное воздействие на экологию окружающего пространства. На основании этого считаем целесообразным включить в структуру ИСЭБ сеть пунктов биомониторинга в районах крупных портов и местах их возможной организации: Мурманск, Архангельск, Нарьян-Мар, Сабетта, Дудинка, Хатанга, Тикси, Певек, Петропавловск-Камчатский, где осуществляются или планируется осуществление погрузочно-разгрузочных работ и хранение предназначенных для транспортировки грузов.

Оцениваемые показатели, собранные в предлагаемой сети пунктов биомониторинга, условно

можно разделить на накапливаемые в результате осаждения твердых частиц, переносимые за счет выщелачивания и поглощаемые вместе с питательными веществами. В работе [14] в качестве биоиндикаторов определены мхи, произрастающие в районах с неблагоприятной экологической обстановкой и в результате проведенного авторами исследования подтверждена эффективность подобного выбора и достоверность получаемых результатов. Предлагаемый авторами факторный анализ позволит создавать карты экологических нагрузок, а характер переноса следовых элементов в атмосфере может быть определен циркуляционными факторами.

В исследовании [15] объективно показана возможность применения анализа состояния зоопланктона, обитающего в акватории гидротехнических сооружений, для оценки качества воды, что позволяет предположить о возможной эффективности подобного метода биомониторинга для применения его результатов в структуре комплексного экологического анализа проводимого ИСЭБ.

Предлагаемая к развертыванию в рамках ИСЭБ СМП сеть пунктов биомониторинга в каждом конкретном случае требует определения набора биоиндикаторов, объективно отражающий экологические параметры, используемые при проведении комплексного экологического анализа ИСЭБ, для чего необходимо проведение дополнительного исследования с привлечением специалистов в соответствующих областях. Также следует отметить, что параллельно с определением набора биоиндикаторов требуется проведение расчетно-аналитической работы по количеству и местам расположения пунктов биомониторинга, определению способов их связи между собой и интеграции этой сети в инфраструктуру ИСЭБ, рассмотренную в работах [1-4, 9].

Дистанционное зондирование Земли. В настоящее время спутниковая информация, выявляющая биологические процессы, их динамику и устойчивость, является мощным инструментом, позволяющим получать как фундаментальные знания об океаносфере, так и практические данные, которые могут быть использованы для проведения комплексного экологического анализа ситуации и осуществления прогнозирования экологического развития территории в рамках ИСЭБ. За счет расширения набора методов получения данных искусственными спутниками Земли с применением различных спектральных диапазонов электромагнитного излучения: ультрафиолетового, видимого, инфракрасного, микроволнового повышаются возможности мониторинга и анализа экологической обстановки СМП. Так в исследовании [16] описаны возможности обнаружения и фиксации глобальных процессов в биосфере, происходящих как в океане, так и на суше, которые было бы невозможно быстро оценить традиционными методами контактных измерений. Использовалась информация спутниковой аппаратуры CZCS (Coastal Zone Color Scanner) и SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) по измерениям поверхностных слоев океана. Результаты исследований подтверждают эффективность использования спутниковой информации для выявления

динамических процессов в глобальном и региональном масштабах.

На основании рассмотренных выше возможностей дистанционного зондирования Земли считаем систематическое получение актуальных спутниковых данных центром обработки данных (ЦОД) ИСЭБ одним из основных источников для формирования оперативных прогнозов, проведения анализа экологической обстановки и картирования ситуации на протяжении всего СМП.

Системы спутникового слежения за миграцией диких животных. Применение современных технологий в сфере передачи данных позволило ученым использовать индивидуальные спутниковые маяки для отслеживания миграции животных, исследования в этом направлении проводятся в ИПЭЭ РАН с 2007 года. Спутниковые метки размещаются на особях выбранной популяции вида, миграция которого отслеживается, так ученые могут получать данные геопозиционирования помеченных особей и делать выводы о направлениях и маршрутах миграции популяции в целом [17].

Сбор и анализ информации, полученной от различных систем спутникового слежения за миграцией диких животных, в районе прохождения СМП, позволит детально оценить влияние

повышения интенсивности использования СМП для транспортировки грузов на популяции диких животных, ареал обитания которых совпадает с маршрутами транспортировки. Обработка этих данных, позволит строить комплексные экологические прогнозы ИСЭБ, предотвращать возникновение экологических угроз и разрабатывать компенсирующие мероприятия для снижения негативного воздействия на экологию региона.

Сеть стационарных подводных зондов. Разработка и развертывание сети стационарных подводных экологических зондов, охватывающей всю значимую территорию СМП, является важным шагом к обеспечению экологической безопасности региона и получению актуальной информации о состоянии водной среды, течениях, биологической активности. Зонды должны обеспечивать непрерывный мониторинг и сбор данных, необходимых для понимания и управления изменениями в окружающей среде. Интеграция этих данных в ИСЭБ СМП позволяет эффективно анализировать информацию, прогнозировать будущие изменения и принимать обоснованные решения для сохранения экосистемы Арктического региона.

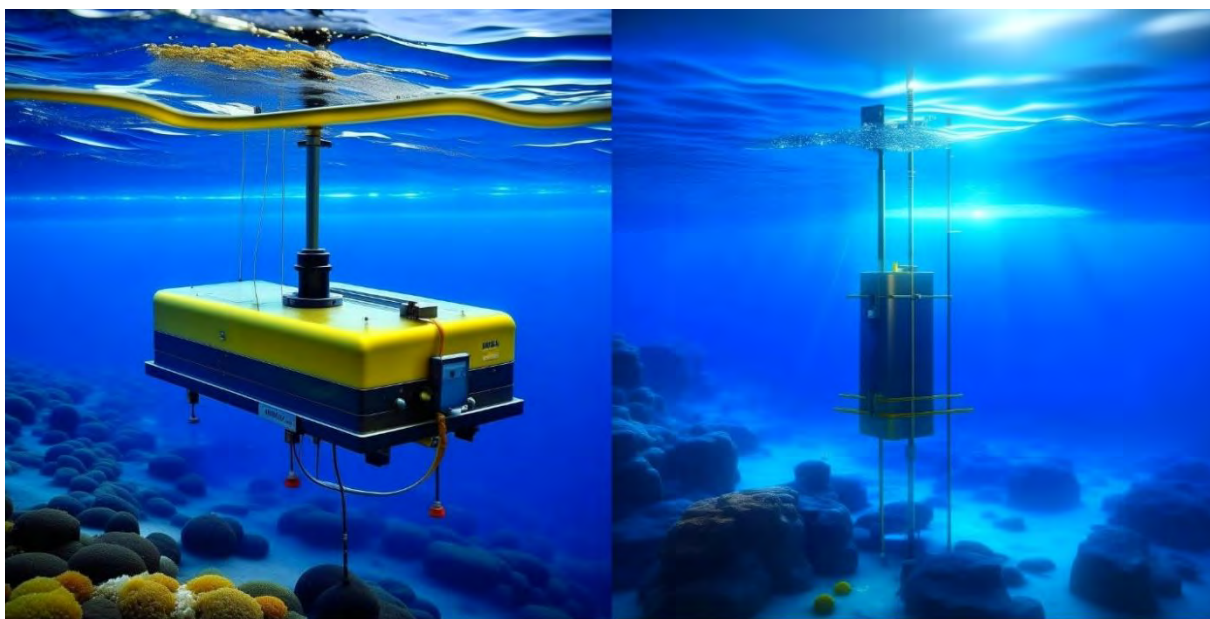


Рис. 2. Иллюстрация возможных вариантов исполнения стационарных подводных зондов и станций приема данных

Создание сетей стационарных подводных экологических зондов уже находит применение в различных регионах мира. Например, такие сети активно используются для мониторинга состояния коралловых рифов и контроля за морскими заповедниками. В рамках ИСЭБ каждый подводный зонд необходимо оснащать сенсорами и датчиками, определяющими изучаемые параметры водной среды. Количество таких параметров определяется исходя из описанных выше показателей допустимых концентраций химических веществ и соединений, закрепленных законодательно и применяемых в анализе и прогнозировании, осуществляемом ЦОД ИСЭБ. Эти сенсоры непрерывно собирают данные и передают их на следующий уровень системы. В

дополнение считаем целесообразным оснащение зондов оптическими системами контроля состояния ледяного покрова над ними, что дополнит картину ледовой обстановки на СМП, формируемую за счет данных, поступающих от систем ДЗЗ и программно-аппаратных комплексов ИСЭБ, установленных на мобильных объектах. Следует отметить необходимость оснащения зондов датчиками, учитывающими физические параметры среды, скорости течений, приливные явления и т.д.

С целью повышения автономности и длительности работы зондов предлагается оснащение их устройствами передачи данных небольшой мощности, достаточными для передачи информации до ближайших соседствующих

элементов сети, в этом случае зонды, не передающие информацию, используются как ретрансляторы. Граничным звеном сети зондов могут выступать станции приема данных, объединенные проводной связью с пунктами геодезического и биологического мониторинга, расположенными на побережье вдоль СМП. Система передачи данных между стационарными подводными экологическими зондами и внешними системами играет важную роль в обеспечении непрерывного мониторинга и анализа состояния окружающей среды. Своевременный анализ получаемых данных позволит эффективно использовать информацию для принятия решений, обеспечения экологической безопасности и понимания влияния человеческой деятельности на морские и океанические экосистемы.

Поскольку в качестве внешней среды для сети зондов выступает вода, считаем целесообразным использовать для беспроводной связи зондов существующие системы акустической связи. Акустические модемы, интегрированные в конструкцию зондов, использующие звуковые волны для передачи данных между зондами и станциями приема данных, которые могут работать на различных частотах и скоростях передачи данных. Это позволит обмениваться информацией на значительные расстояния, хотя скорость передачи данных может быть ограниченной. Описанный подход требует углубленной проработки, что позволит в дальнейшем более детально описать и разработать систему акустической подводной связи сети экологических зондов.

Сеть условно стационарных аэрозондов с возможностью корректировки положения в пространстве. Арктическая зона играет ключевую роль в глобальной климатической системе Земли и имеет огромное значение для множества экосистем планеты. Арктика является барометром климатических изменений. Концепция создания ИСЭБ подчеркивает важность непрерывного мониторинга состояния воздуха в арктической зоне. Мониторинг атмосферных параметров позволяет выявлять ранние признаки климатических изменений, отслеживать перемещение и концентрацию загрязнителей, определять связи между изменениями в атмосфере и состоянием льдов, морскими и сухопутными экосистемами. Как отмечено в статье [18] на стационарных станциях Росгидромета число определяемых токсичных элементов в составе атмосферного воздуха сильно ограничено и включает, как правило, тяжелые металлы. В настоящее время существует потребность в контроле загрязнения атмосферного воздуха, в том числе многоэлементном анализе поступающих загрязнений, что можно считать основанием для развёртывания сети условно стационарных аэрозондов с возможностью корректировки своего положения в пространстве для постоянного мониторинга состояния воздуха на протяжении всего СМП и на территориях, граничащих с ним.

Информация поступающая в постоянном режиме в Центр контроля и управления (ЦКУ) ИСЭБ позволит поддерживать актуальную карту состояния воздушной среды в зоне СМП, оперативно реагировать на значительные изменения

обстановки, в свою очередь статистические данные хранимые и обрабатываемые в ЦОД ИСЭБ, в совокупности с данными от других зондов, мобильных и стационарных объектов ИСЭБ, позволят определить экологические тенденции территории и строить экологические прогнозы ее развития.

Аэрозонды, при их оснащении оптическими системами видеосъемки, могут рассматриваться как один из элементов глобальной системы дистанционного зондирования земли. В случае сбора и передачи видеoinформации считаем целесообразным применение алгоритмов кодирования без потерь, детально описанных в статьях [19, 20].

Поскольку в рамках одной публикации невозможно подробно изложить расчеты по порядку определения зон расположения аэрозондов и их привязку к стационарным объектам ИСЭБ, описать алгоритмы действий зондов в зависимости от метеословий, требований и команд ЦКУ ИСЭБ СМП, данных систем самодиагностики зондов, они будут приведены в последующих публикациях авторов по данной тематике. Помимо этого, требуется проведение дополнительных исследовательских изысканий с целью определения оптимальных технических параметров исполнения конструкции аэрозондов, таких как форма, размер, энергоисточники, способы корректировки положения в пространстве, оснащение оборудованием, система связи и т.п.

О моделях и алгоритмах

Для обработки данных собранных ЦОД ИСЭБ от программно-аппаратных модулей мобильных и стационарных объектов, стационарных подводных зондов, условно стационарных аэрозондов и описанных выше внешних систем требуется разработка математических моделей и алгоритмов, основанных на существующих знаниях о взаимодействии транспортной деятельности и экологических процессов в АЗ РФ с учетом пространственной и временной изменчивости экологических параметров и факторов, таких как ледовый режим, морская фауна и флора, и климатические условия.

Результаты программной реализации разработанных моделей и алгоритмов могут в дальнейшем быть использованы как для получения фундаментальных знаний о динамике глобальных экологических процессов, связанных с деятельностью человека, так и для различного типа прикладных задач, не связанных с экологией.

Заключение

Учитывая представленное выше, авторы пришли к выводу об актуальности продолжения расширения структуры Интеллектуальной системы экологической безопасности (ИСЭБ) в рамках АЗ РФ и Северного морского пути (СМП) в частности. Указанные исследования отвечают потребности в учете прогнозируемых изменений в экологической обстановке данного региона, особенно в свете увеличивающейся экономической значимости СМП для торгового товарооборота Российской Федерации.

Предложенная в данной статье структура ИСЭБ СМП обеспечивает наиболее полное выполнение поставленных перед ней задач. Главным результатом деятельности ИСЭБ является анализ и интерпретация данных с целью определения экологического состояния и потенциальных угроз. Однако, развитие прогностических элементов ИСЭБ, как задумано авторами, будет способствовать более точному определению стратегий развития СМП, с акцентом на сохранении уникальных экологических систем данного региона, при этом не ущемляя его экономическую эффективность.

В целом, развитие ИСЭБ СМП в соответствии с предложенными дополнениями представляет собой важный шаг в обеспечении экологической безопасности в АЗ РФ. Это также способствует более устойчивому и сбалансированному развитию данного региона, что остается приоритетной задачей в контексте изменяющейся климатической и экономической динамики.

Для более полной и эффективной реализации предложенных дополнений в структуру Интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути, необходимо провести дополнительные научные изыскания. Эти исследования должны быть направлены на выявление оптимальных расчетных характеристик разворачиваемых сетей экологических зондов, а

также на уточнение технических параметров самих зондов.

Расчетные характеристики сетей экологических зондов должны быть определены с учетом особенностей арктической среды, включая изменяющиеся климатические условия, сезонные вариации, и географическое разнообразие региона с учетом социально-экономического аспекта. Эти характеристики должны обеспечивать эффективное покрытие всей территории СМП, а также учитывать потребность в мониторинге различных экологических параметров, включая состояние льда, температуру воды, химические составы, и другие факторы, влияющие на экосистему.

С учетом технических параметров зондов, таких как их максимальная глубина погружения, длительность автономной работы, точность измерений, и сопротивляемость агрессивным окружающим условиям, необходимо провести исследования и разработки, чтобы обеспечить их надежное и устойчивое функционирование в условиях арктического климата и морской среды.

Таким образом, дополнительные научные исследования по расчетным характеристикам разворачиваемых сетей экологических зондов и техническим параметрам самих зондов представляют собой важный этап в развитии ИСЭБ и в обеспечении более точного и надежного мониторинга экологической обстановки в АЗ РФ.

Литература

1. Малыгин И. Г., Гавкалюк Б. В., Кузнецова Е. Ю. Интеллектуальная система экологической безопасности – основа арктического интеллектуального мультимодального транспортного коридора Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы-2021: Материалы Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: ИПТ РАН, 2021. – С. 8-12.
2. Малыгин И.Г., Кузнецова Е.Ю. Предложения по разработке интеллектуальной системы управления экологической безопасностью Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.1, № 1, – С. 121-127. DOI: 10.37220/MIT.2022.55.1.015.
3. Кузнецова Е.Ю., Кириченко А.В., Михайлова М.Ю., Турусов С.Н. Формирование интеллектуальной системы мониторинга экологической обстановки Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.1, № 2, – С. 201-209. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.027.
4. Малыгин И.Г., Кузнецова Е.Ю. Разработка теоретических основ построения интеллектуальной системы экологической безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Евразийская экономическая перспектива: сборник материалов IX Международного форума. Санкт-Петербург, 28-29 октября 2021 г. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2022. – С. 109-114.
5. Кафтан В.И. Геодезический мониторинг ответственных объектов недвижимости // Кадастр недвижимости. Геодезия. 2010. №3 (20), С. 37-43.
6. Карпик А.П., Липатников Л.А. О возможности контроля положения опорных пунктов в системах геодезического мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. №2. С. 38-44.
7. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Принципы построения интеллектуальной системы экологической безопасности и навигационного сопровождения мультимодальных перевозок отработавшего ядерного топлива // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2, Т. 1(60). – С. 226-235. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.028.
8. Петров Е.А., Купчинский А.Б. Влияние раннего разрушения ледяного покрова и высокого уровня воды на функционирование берегового лежбища байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gm.) на о. Долгом (оз. Байкал) по материалам 2020 г. // Известия ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 1. — С. 163–178. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-163-178.
9. Малыгин И.Г., Коновалов И.Н. Структура интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т.1, № 4. – С. 215-221. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.045.
10. СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177#6540IN> (дата доступа 01.09.2023).
11. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902065388> (дата обращения 01.09.2023).

12. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6540IN> (дата обращения 01.09.2023).
13. ГН 2.1.5.689-98 «Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004636> (дата обращения 01.09.2023).
14. Косумов Р.С., Оказова З.П. Биоиндикация в оценке состояния трансграничных территорий // *International agricultural journal*. – 2022. – № 1. – С. 32-41. DOI: 10.55186/25876740.2023.7.1.5.
15. Кулаков Д.В. Исследования зоопланктона трансграничной реки Неман в период строительства и консервации Балтийской АЭС // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2023. – № 1. – С. 64-77. DOI: 10.35567/19994508.2023.1.5.
16. Шевырных А.П., Высоцкая Г.С., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботвич И.Ю. Перспективы глобального и регионального мониторинга динамики фитопигментов в океане и на суше на основе дистанционного зондирования Земли // *Журнал СФУ. Техника и технологии*. – 2023. – № 16(1). – С. 104–114.
17. Marsh C.J., Sica Y.V., Burgin C.J. et al. Expert range maps of global mammal distributions harmonised to three taxonomic authorities // *Journal of Biogeography*. – 2022. – Vol.49, №5. – P.979–992. DOI: 10.1111/jbi.14330.
18. Кульнев В.В., Кизеев А.Н., Борисова Д.С., Бурова Д.В., Чашин В.П., Никанов А.Н. Метеоиндикация состояния рудных районов // *Проблемы региональной экологии*. – 2023. – № 1. – С. 87-97. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-1-87-97.
19. Королёв О.А., Фахми Ш.С., Костинова Е.В. Кодирование без потерь и передача изображений морских судов в условиях ограничения канала связи // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – Т.1, № 1. – С. 45-52. DOI:10.37220/MIT.2021.51.1.007.
20. Малыгин И.Г., Королев О.А. Высокоскоростной алгоритм передачи видеoinформации о чрезвычайных ситуациях на объектах транспорта // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – Т.1, № 1. – С. 64-70. DOI:10.37220/MIT.2021.51.1.009.

References

1. Malygin I. G., Gavkaljuk B. V., Kuznetsova E. Ju. Intellektual'naja sistema jekologicheskoy bezopasnosti – osnova arkticheskogo intellektual'nogo mul'timodal'nogo transportnogo koridora Rossijskoj Federacii [Intelligent Environmental Safety System – the basis of the Arctic Intelligent Multimodal transport Corridor of the Russian Federation] // *Transport Rossii: problemy i perspektivy-2021: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Sankt-Peterburg, 09–10 nojabrja 2021 goda*. – Sankt-Peterburg: Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN, 2021. – S. 8-12.
2. Malygin I.G., Kuznetsova E.Yu. Proposals for development of intelligent environmental safety management system for the Northern Sea Route // *Marine intellectual technologies*. – 2022. – Vol.1., №1. – pp. 121-127. DOI: 10.37220/MIT.2022.55.1.015.
3. Kuznetsova E.Yu., Kirichenko A.V., Mikhailova M.Y., Turusov S.N. Formation of an intelligent system for monitoring the environmental situation of the Northern Sea Route // *Marine intellectual technologies*. – 2022. – Vol.1., №2. – pp. 201-209. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.027.
4. Malygin I.G., Kuznetsova Ye.YU. Razrabotka teoreticheskikh osnov postroyeniya intellektual'noy sistemy glavnoy bezopasnosti Arkticheskoy zony Rossiyskoj Federatsii [Development of theoretical foundations for the construction of an intellectual system of environmental safety of the Arctic zone of the Russian Federation] // *Yevraziyskaya ekonomicheskaya perspektiva: sbornik materialov IX Mezhdunarodnogo foruma. Sankt-Peterburg, 28-29 oktyabrya 2021 g.* – SPb.: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy ekonomicheskij universitet, 2022. – S. 109-114.
5. Kaftan V.I. Geodezicheskij monitoring otvetstvennykh ob'ektov nedvizhimosti [Geodetic monitoring of responsible real estate objects] // *Kadastr nedvizhimosti. Geodezija*. – 2010. – №3 (20). – S. 37-43.
6. Karpik A.P., Lipatnikov L.A. O vozmozhnosti kontrolja polozheniya opornykh punktov v sistemah geodezicheskogo monitoringa [About the possibility of controlling the position of reference points in geodetic monitoring systems] // *Interjekspos Geo-Sibir*. – 2015. – №2. – S. 38-44.
7. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A. Principles of building an intelligent environmental safety system and navigation support for multimodal transportation of spent nuclear fuel // *Marine intellectual technologies*. – 2023. – № 2, Vol.1. – pp. 226-235. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.028.
8. Petrov Ye.A., Kupchinskiy A.B. Vliyaniye rannego narusheniya ledyanogo pokrova i vysokogo urovnya vody na funkcionirovaniye beregovogo lezhbishcha baykal'skoy nerpy (Pusa sibirica Gm.) na o. Dolgom (oz. Baykal) po materialam 2020 g. [The influence of early destruction of the ice cover and high water levels on the functioning of the coastal rookery of the Baikal seal (Pusa sibirica Gm.) on the island. Dolgov (Lake Baikal) based on materials from 2020] // *Izvestiya TINRO*. – 2023. – T. 203, vyp. 1. – S. 163–178.
9. Malygin I.G., Konovalov I.N. The structure of the intellectual system of environmental safety of the Northern Sea Route // *Marine intellectual technologies*. – 2022. – Vol.1., №4. – pp. 215-221. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.045.
10. СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию условий перемещения в атмосферного воздействия, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилищам, жилищно-коммунальным, производственной деятельности, общечеловеческим помешениям, организациям и проведению санитарно-противоэпидемиологических (профилактических) мероприятий». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177#6540IN> (дата доступа 01.09.2023).
11. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902065388> (дата обращения 01.09.2023).

12. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka sredy obitaniya». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6540IN> (data obrashcheniya 01.09.2023).
13. GN 2.1.5.689-98 «Predel'no dopustimyye soderzhaniya khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaystvenno-pit'yevogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004636> (data obrashcheniya 01.09.2023).
14. Kosumov R.S., Okazova Z.P. Bioindikatsiya v sostoyanii sostoyaniya transgranichnykh territoriy [Bioindication in assessing the state of transboundary territories] // Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal. – 2022. – № 1. – S. 32-41. DOI: 10.55186/25876740.2023.7.1.5.
15. Kulakov D.V. Issledovaniya zooplanktona transgranichnoy reki Neman v period stroitel'stva i konservatsii Baltiyskoy AES [Research of zooplankton of the transboundary Neman River during the construction and conservation of the Baltic NPP] // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye. – 2023. – № 1. – S. 64-77. DOI: 10.35567/19994508.2023.1.5.
16. Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Pis'man T.I., Kononova N.A., Botvich I.YU. Perspektivy global'nykh i regional'nykh dinamiki fitopigmentov v okeane i na sushe na osnove distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Prospects for global and regional monitoring of the dynamics of phytopigments in the ocean and on land based on remote sensing of the Earth] // Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii. – 2023. – № 16(1). – S. 104–114.
17. Marsh C.J., Sica Y.V., Burgin C.J. et al. Expert range maps of global mammal distributions harmonised to three taxonomic authorities // Journal of Biogeography. - 2022. - Vol.49, №.5. - P.979–992. DOI: 10.1111/jbi.14330.
18. Kul'nev V.V., Kizyeyev A.N., Borisova D.S., Burova D.V., Chashchin V.P., Nikanov A.N. Meteindikatsiya sostoyaniya rudnykh rayonov [Meteoindication of the state of ore regions] // Problemy regional'noy ekologii. – 2023. – № 1. – S. 87-97. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-1-87-97.
19. Korolev O.A., Fahmi S.S., Kostikova E.V. The lossless encoding and transmission of ships images in the conditions of limited channel // Marine intellectual technologies. – 2021. – Vol.1., №1. – pp. 45-52. DOI:10.37220/MIT.2021.51.1.007.
20. Malygin I.G., Korolev O.A. High-speed algorithm for transmitting video information about emergency situations on transport objects // Marine intellectual technologies. – 2021. – Vol.1., №1. – pp. 64-70. DOI:10.37220/MIT.2021.51.1.009.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13.; e-mail: malygin_com@mail.ru

Коновалов Иван Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: info@iptran.ru

Королёв Олег Александрович, кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13, e-mail: korolev@iptran.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng.), director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: malygin_com@mail.ru

Ivan N. Kononov, PhD (Eng.), senior research scientist, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: info@iptran.ru

Oleg A. Korolev, PhD (Eng.), scientific secretary, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, 12-th Line VO, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: korolev@iptran.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 31.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.11.2023.

Научная статья

УДК 629.584

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.018>

Разработка информационно-управляющей системы для гибридного необитаемого подводного аппарата на основе платформы ROS2

Юхимец Д.А.^{1,2,3} yukhimets.da@dvfu.ru, Белоусов М.Д.^{1,3} belousov.md@students.dvfu.ru,
Губанков А.С.^{1,2,4} gubankov@dvo.ru

¹Дальневосточный федеральный университет, ²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ³Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, ⁴МГУ им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. В статье предложена архитектура информационно-управляющей системы (ИУС) для гибридного необитаемого подводного аппарата (ГНПА). Спроектированная ИУС позволяет ему выполнять задачи как в автономном, так и в телеуправляемом режиме, что обеспечивает решение широкого спектра задач. Предлагаемая система разработана на основе платформы ROS2 и реализована на аппарате МГА-7ДФ с учетом набора его аппаратных средств. Использование ROS2 позволяет легко дорабатывать систему в будущем, упрощая разработку дополнительных программных компонентов. Предложен способ распределения задач между микроконтроллером и микрокомпьютером, и способ организации связи между двумя устройствами. Для аппарата были реализованы узлы для проведения экспериментов на модели в среде моделирования CoppeliaSim в режиме телеуправления и автономном режиме. Работа ИУС была также проверена в ходе экспериментальных исследований на акватории Амурского залива в г. Владивосток.

Ключевые слова: Гибридный необитаемый подводный аппарат, информационно-управляющая система, ROS2.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 22-29-01156)

Для цитирования: Юхимец Д.А., Белоусов М.Д., Губанков А.С. Разработка информационно-управляющей системы для гибридного необитаемого подводного аппарата на основе платформы ROS2, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 143—152. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.018

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.018>

Development of ROS-based information-control system for hybrid unmanned underwater vehicle

Dmitry A. Yukhimets^{1,2,3} yukhimets.da@dvfu.ru, Mikhail D. Belousov^{1,3} belousov.md@students.dvfu.ru,
Anton S. Gubankov^{1,2,4} gubankov@dvo.ru

¹Far Eastern Federal University, ²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, ³M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, ⁴Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy

Abstract. The article proposes an architecture of an information-control system for hybrid unmanned underwater vehicle. The designed system allows it to perform tasks both in autonomous and remote-controlled modes, and provides a wide range of tasks to be solved. The considered system was developed on the basis of the ROS2 platform and implemented on the hybrid uninhabited underwater vehicle MGA-7DF, taking into account its hardware set. Using ROS2 makes it easy to refine the system in the future, simplifying the development of additional software components. A method for distributing tasks between a microcontroller and a microcomputer, and a method for organizing communication between these two devices are proposed. Nodes for simulation in the CoppeliaSim environment in remote control and autonomous mode were implemented for the vehicle. The work of the information-control system was also tested during experimental studies in the area of the Amur Bay in Vladivostok.

Keywords: Hybrid unmanned underwater vehicle, information-control system, ROS2.

Financial Support: This work is supported by Russian Scientific Foundation (grant 22-29-01156).

For citation: Dmitry A. Yukhimets, Mikhail D. Belousov, Anton S. Gubankov, Development of ROS-based information-control system for hybrid unmanned underwater vehicle, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 143—152. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.018

Введение

В настоящее время часто возникает необходимость выполнения поисковых, инспекционных и других видов работ в толще воды или вблизи дна. Причем выполнение работ под водой с использованием обитаемых средств связано с риском для персонала или является малоэффективным. Использование необитаемых подводных аппаратов (НПА) позволяет избежать указанных рисков при выполнении технологических

операций в водной среде, что обуславливает увеличение спроса на такие средства [1].

Все необитаемые средства выполнения подводных операций можно разделить на два больших класса: телеуправляемые и автономные. Эти классы предназначены для выполнения задач разных типов и имеют как конструктивные, так и функциональные отличия, заключающиеся в наборе используемого бортового оборудования. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) обычно предназначены для

выполнения различных технологических операций, предполагающих использование манипулятора, и осмотровых работ, выполняемых с помощью видеокамер вблизи подводных конструкций и объектов. Так как все выполняемые операции происходят под руководством оператора, то основное внимание при разработке обращается на реализацию эргономичных интерфейсов взаимодействия, а также различных алгоритмов стабилизации, обеспечивающих зависание ТПНА вблизи объектов работ [2].

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) выполняют в основном операции, связанные с обследованием больших площадей (картографирование, поиск, мониторинг окружающей среды и т.д.), без непосредственного взаимодействия с оператором. Поэтому при разработке их систем управления основное внимание уделяется созданию комплексированных навигационных систем [3], интеллектуальных систем планирования действий в заранее неизвестной обстановке, высокоточных систем автоматического управления пространственным движением АНПА, а также интеллектуальных систем диагностики и отказоустойчивого управления [4].

При этом в процессе выполнения подводных операций (например, в процессе поиска и детального визуального обследования подводных объектов) может потребоваться как выполнение автономных миссий (поиск на больших площадях), так и работа в режиме телеуправления (визуальный осмотр найденных объектов). Традиционно для решения этих задач используют два вида различных НПА, что приводит к необходимости использования большого количества разнообразного оборудования. Поэтому для таких миссий целесообразно использовать гибридные НПА (ГНПА), совмещающие функции АНПА и ТНПА. При этом наличие на борту такого ГНПА автономного источника энергии позволит обойтись для связи с ним легким оптоволоконным кабелем, а в случае возможных неисправностей или повреждения кабеля за счет автономных функций обеспечить аварийное всплытие аппарата на поверхность и избежать его потери.

Одной из проблем, требующих решения при создании таких ГНПА, является разработка их бортовых информационно-управляющих систем, обеспечивающих эффективное совмещение автономных и телеуправляемых функций.

Обычно ИУС конкретного НПА имеет привязку к аппаратной части аппарата (набору датчиков, вычислительных средств и исполнительных устройств) и набору его требуемых функциональных свойств, что приводит к необходимости разработки новой ИУС каждого отдельного аппарата.

В качестве ИУС для ТНПА, особенно малых осмотровых аппаратов, часто используют уже готовые управляющие системы, применяемые для управления беспилотными системами различного типа (беспилотные летательные аппараты, ТНПА, мобильные наземные роботы). Одной из таких систем является ArduPilot, содержащий в себе готовый набор программ с алгоритмами навигации, управления оборудованием и элементами интерфейса. Но сложность использования данной системы заключается в строго регламентированном подключении оборудования через специальную

распределительную плату и ограниченный набор поддерживаемого оборудования, что делает невозможным использование такой системы при наличии оборудования, отличающегося от предполагаемой разработчиками системы. Так же использование ArduPilot затруднено в системах, где отсутствует доступ к спутниковым системам навигации, что делает невозможным его применение в автономных подводных системах.

При этом для создания более сложных автономных робототехнических систем уже существует достаточно большое количество программных платформ. Эти платформы (см., например, Player Project, URBI, ROS) содержат необходимые инструменты, позволяющие стандартизировать программные компоненты внутри системы, использование которых позволит применить готовую среду передачи данных и упростить разработку программного обеспечения в процессе дальнейшей эксплуатации [5]. Однако такие платформы как Player Project и URBI применяют крайне редко и их использование в ИУС новых роботов проблематично из-за слабо проработанной или отсутствующей документации. Наиболее популярной является платформа ROS2, которая используется для реализации ИУС различных робототехнических платформ (манипуляторов [6], мобильных роботов [7], безэкипажных катеров [8] и др.). Указанная платформа содержит большое количество разработанных компонентов, которые реализуют различные алгоритмы навигации, обработки визуальной информации, планирования и т.д., что существенно упрощает разработку ИУС для автономного выполнения миссий. При этом ИУС, построенные на ROS2, допускают достаточно простую модификацию в случае необходимости подключения нового, в том числе и уникального бортового оборудования.

Поэтому в статье рассматривается задача разработки ИУС гибридного подводного аппарата, который может функционировать как автономно, выполняя заданную миссию, так и в режиме телеуправления для проведения осмотровых операций. Указанная ИУС реализуется на основе платформы ROS2. При этом в статье предлагается распределение задач и механизмы взаимодействия между бортовым одноплатным компьютером, на котором запущена операционная система с платформой ROS2, и управляющим контроллером, который обеспечивает формирование управляющих сигналов на движители подводного аппарата и взаимодействие с его бортовыми датчиками.

Указанная ИУС рассматривается на примере экспериментального гибридного подводного аппарата МГГА-7ДФ с конкретным набором аппаратных средств, установленных на нём. Полученная система содержит необходимые компоненты для управления необитаемым подводным аппаратом и может быть легко дополнена или изменена в ходе эксплуатации.

Постановка задачи

В процессе разработки ИУС ГНПА были сформулированы следующие требования:

1) ИУС должна быть реализована на базе платформы ROS2 для обеспечения модульности

программных компонентов и упрощения расширения системы.

2) ИУС должна обеспечивать управление аппаратом в реальном масштабе времени с частотой выработки сигналов управления не менее 20 Гц.



Рис. 1. Внешний вид аппарата МГГА-7ДФ

3) ИУС ГНПА должна иметь два возможных режима состояния: режим нормальной работы, в котором аппарат выполняет заложенную в нем миссию или работает в режиме телеуправления и аварийный режим, обеспечивающий всплытие аппарата в случае выявления неисправности.

Разработка ИУС ГНПА выполнялась для малогабаритного экспериментального аппарата МГГА-7ДФ, показанного на рисунке 1.

Аппарат содержит два бортовых вычислительных устройства: одноплатный компьютер LattePanda и микроконтроллер ESP32. Также он оснащен следующим набором датчиков:

- инерциальные измерительные модули (ИИМ) ГKB-5 и Pololu IMU,
- датчик давления Bar 30,
- компас C100,
- датчик высоты над грунтом Ping Sonar,
- USB web видеочамера,
- ZED stereo камера.

Для связи с оператором в аппарате установлен медиаконвертер, позволяющий передавать данные по оптоволоконному кабелю. Для отображения

состояния аппарата на аппарате установлен сигнальный RGB светодиод.

Представленный набор оборудования позволяет ГНПА выполнять автономные миссии по построению трехмерных моделей подводных объектов в сложных условиях с помощью стереокамеры, а также производить визуальный осмотр под непосредственным управлением оператора.

Наличие встроенного источника питания позволяет использовать легкий оптоволоконный кабель для связи с ГНПА, что значительно упрощает его эксплуатацию.

Архитектура ИУС ГНПА

Схема подключений оборудования аппарата МГГА-7ДФ показана на рисунке 2. К микроконтроллеру ESP-32 по интерфейсу I2C подключаются датчики Pololu IMU и Bar30 и по последовательному порту - компас C100. Связь между микроконтроллером и микрокомпьютером осуществляется через встроенный USB-UART конвертер микроконтроллера и USB кабель. К микрокомпьютеру подключается ZED камера к USB2.0 и USB концентратор, позволяющий подключить Web камеру, ГKB-5 и Ping Sonar. Для подключения ГKB-5 используется преобразователь RS485-USB, а для подключения Ping Sonar используется преобразователь RS232-USB.

При этом предполагалось, что одноплатный компьютер решает задачи верхнего уровня, присущие автономным системам (обработка изображений от стереокамеры, построение трехмерных моделей, формирование траекторий обхода препятствий и следования дну), что требует подключения соответствующих сенсоров к указанному компьютеру. А контроллер, в свою очередь, решает более низкоуровневые задачи, возникающие в процессе телеуправления (пересчет сигналов управления от пульта оператора в сигналы управления двигателями, сбор и первичная обработка данных от бортовых инерциальных датчиков) и аварийный режим работы ГНПА.

Диаграмма состояний ИУС показана на рисунке 3. Система в процессе работы может находиться в 6-х возможных состояниях.

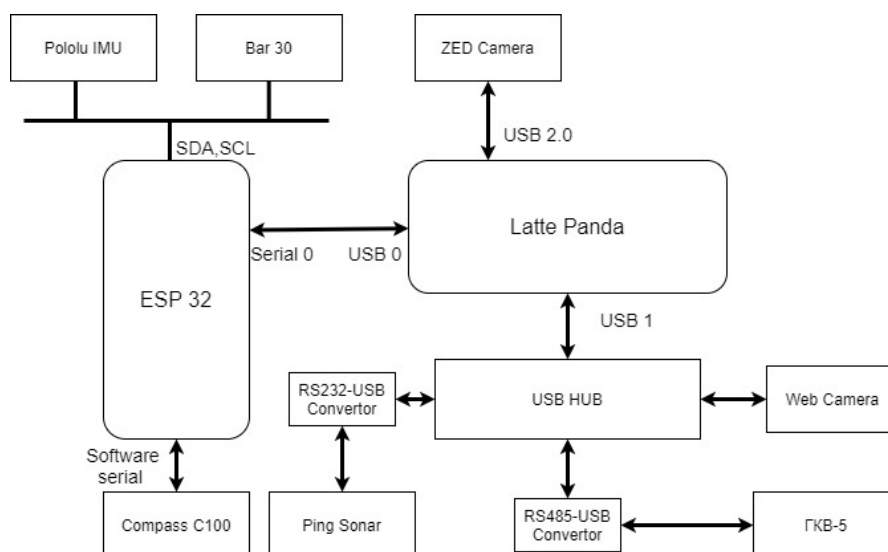


Рис. 2. Схема подключения оборудования на аппарате

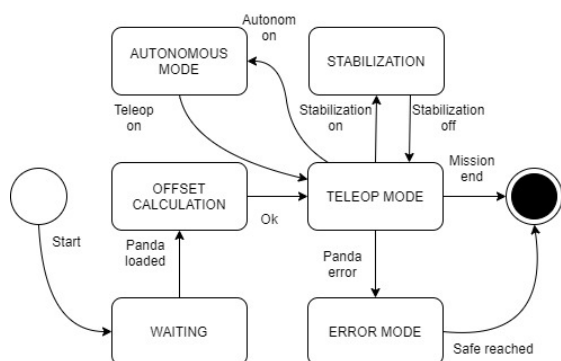


Рис. 3. Диаграмма состояний системы

1. Состояние WAITING. В процессе инициализации аппарат переходит в режим ожидания загрузки микрокомпьютера (WAITING), при этом цвет сигнального светодиода становится синим. Основная задача, выполняемая в этом состоянии, заключается в установке связи между компьютером LattePanda и контроллером ESP32. После успешной загрузки компьютера и установки связи ИУС переходит в состояние OFFSET CALCULATION.

2. Состояние OFFSET CALCULATION. В этом состоянии ИУС выполняет калибровку бортовых датчиков (вычисление смещений, установка нулей и т.д.), сигнальный светодиод загорается зеленым цветом. Когда аппарат завершает калибровку датчиков он переходит в рабочий режим где он может находиться в одном из 3-х состояний.

4. Состояние TELEOP MODE переводит аппарат в состояние телеуправления, который позволяет оператору непосредственно управлять аппаратом формируя сигналы управления с пульта. Это состояние включается по умолчанию, а переход в другие режимы работы происходит по команде оператора.

4. Состояние STABILIZATION, в котором обеспечивается стабилизация отдельных параметров движения аппарата (скорость, глубина, курс, дифферент, крен) при управлении оператором. Это позволяет снизить нагрузку на оператора при выполнении сложных маневров вблизи объекта работ.

5. Состояние AUTONOMOUS MODE, в котором аппарат может выполнять заданные миссии в автономном режиме. Необходимым условием работы аппарата в этом режиме является наличие файла с описанием миссии, загруженным в бортовой компьютер.

6. Состояние ERROR MODE, в которое ГНПА переходит в случае отказа бортового компьютера или прерывания связи контроллера с бортовым компьютером (если в течение заданного промежутка времени не поступают команды управления). В этом режиме основным вычислительным устройством становится микроконтроллер ESP32, задачами которого становится обеспечить всплытие ГНПА.

На микрокомпьютере Latte Panda запущены узлы для обработки данных, поступающих от стереокамеры, эхолота, а также узлы, обеспечивающие реализацию команд автономного управления, управления выполнением миссией, планирования траекторий, обработкой команд

телеуправления. Микрокомпьютер объединён в локальную сеть обмена данными с компьютером оператора с помощью роутера и медиаконвертера. Оператор может иметь доступ ко всем сообщениям. Этот канал связи используется для реализации телеуправления, логирования и программирования подводного аппарата. Типы сообщений, которыми обмениваются модули в бортовой ИУС ГНПА (топики), представлены в таблице 1.

Описание системы, запускаемой на микроконтроллере ESP32

Микроконтроллер имеет существенно меньшую вычислительную мощность по сравнению с микрокомпьютером. Из-за этого необходимо обеспечить работу системы на микроконтроллере с достаточной частотой, которая для подводных аппаратов принимается равной 20 Гц. С учетом широкого спектра задач, которые должен решать микроконтроллер, обеспечение требуемой частоты работы может быть выполнено только при условии создания на нем многопоточного приложения, которое будет задействовать два ядра контроллера.

На первом ядре выполняются задачи, связанные с передачей данных, собранных от подключенных к нему датчиков, на микрокомпьютер LattePanda, «слежением» за работоспособностью компьютера и расчетом управляющих сигналов на каждый движитель ГНПА. На втором ядре выполняются задачи, связанные со сбором и обработкой данных от датчиков, в частности реализован алгоритм расчета углов ориентации ГНПА с помощью фильтра Маджвика [9].

Для обеспечения многопоточности работы микроконтроллера, его программа написана с использованием микрооперационной системы FreeRTOS, а ее схема показана на рисунке 4. Для обеспечения связи между микрокомпьютером и микроконтроллером была использована библиотека MicroROS, позволяющая представить микроконтроллер полноценным узлом ROS.

Когда ГНПА находится в состоянии инициализации (WAITING) микроконтроллер ожидает запуска компьютера и устанавливает с ним связь, после чего происходит инициализация и калибровка модуля Pololu IMU. В процессе инициализации контроллер проверяет связь с компьютером и переводит систему в рабочий режим в случае успеха инициализации. Если связь с микрокомпьютером не была установлена система переходит в аварийный режим. Весь процесс инициализации происходит на ядре Core_0.

В процессе работы ГНПА ядро контроллера Core_1 выполняет сбор и обработку данных от датчиков. Для этого на контроллере задействуются следующие интерфейсы: I2C для обмена данными с датчиком глубины и Pololu IMU; Serial для обмена данными с компасом C100. Полученные данные от ИИМ обрабатываются с помощью фильтра Маджвика для оценки углов ориентации аппарата. Выходными данными указанного алгоритма является ориентация объекта в виде кватерниона, что требует дополнительного пересчета для получения величин углов крена, курса и дифферента [9].

Таблица 1

Типы сообщений топиков

Название топика	Тип данных	Описание топика
/Thrust_data	geometry_msgs/Vector3	Топик, в который публикуется сообщение, содержащее зашифрованные данные о желаемых силах и моментах
/Imu1_raw_data	geometry_msgs/Twist	Топик, содержащий данные об ускорениях и угловых скоростях с модуля Pololu IMU
/Imu1_orientation	geometry_msgs/Vector3	Топик, содержащий данные об ориентации с модуля Pololu IMU
/Depth	std_msgs/Float32	Топик, содержащий данные о глубине
/Compass	std_msgs/Float32	Топик, содержащий данные о курсе с компаса C100
/IMU2_raw_data	geometry_msgs/Twist	Топик, содержащий данные об ускорениях и угловых скоростях с модуля ГKB-5
/Image_left	Sensor_msgs/Image	Топик, содержащий изображение с левого объектива ZED камеры
/Image_right	Sensor_msgs/Image	Топик, содержащий изображение с правого объектива ZED камеры
/Image	Sensor_msgs/Image	Топик, содержащий изображение с WEB камеры
/Heigh_bottom_data	std_msgs/Float32	Топик, содержащий данные о высоте над грунтом
/Target_Thrust	geometry_msgs/Twist	Топик, содержащий данные о желаемом векторе сил и моментов
/eTx_topic.../eMz_topic	std_msgs/Float32	Топики, содержащие данные об ошибках по линейным координатам и углам

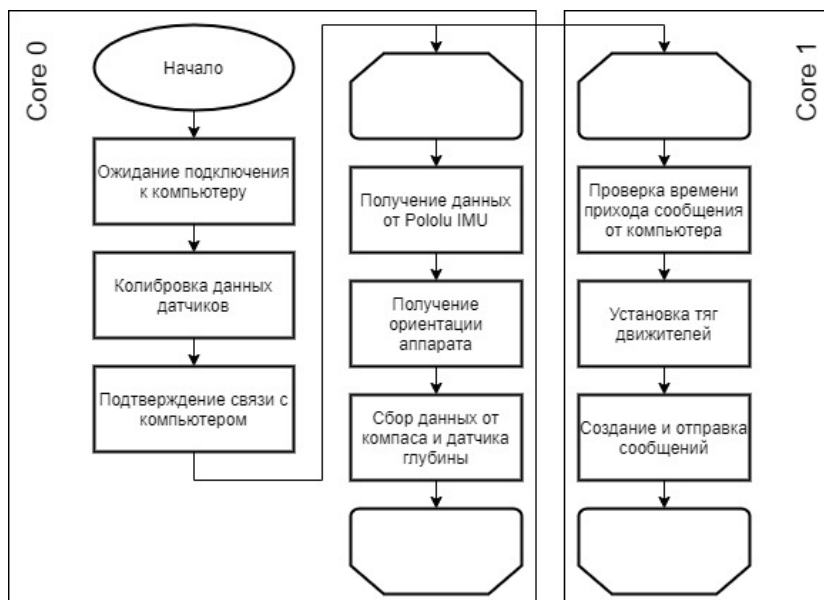


Рис. 4. Схема реализации многопоточной программы контроллера ГНПА

При этом следует отметить, что система координат ИИМ ($x'y'z'$ на рис. 5) не совпадает с системой координат ГНПА (xyz на рис. 5), из-за того, что в подводной робототехнике ось z принято направлять вниз [10]. Это требует учета в расчёте, путем изменения на отрицательные знаков углов курса и дифферента, полученных в результате работы фильтра Маджвика. Таким образом, выражения для расчета углов ориентации ГНПА имеют вид [11].

$$\begin{aligned}\psi &= \operatorname{atan2}\left(\frac{2q_1q_4 + 2q_2q_1}{1 - 2q_2^2 - 2q_3^2}\right), \\ \theta &= -\arcsin(2q_3q_1 - 2q_2q_4), \\ \varphi &= -\arctg\left(\frac{2q_2q_3 + 2q_1q_4}{1 - 2q_3^2 - 2q_4^2}\right),\end{aligned}\quad (1)$$

где φ – угол курса подводного аппарата; θ – угол дифферента; ψ – угол крена; q_1, q_2, q_3, q_4 –

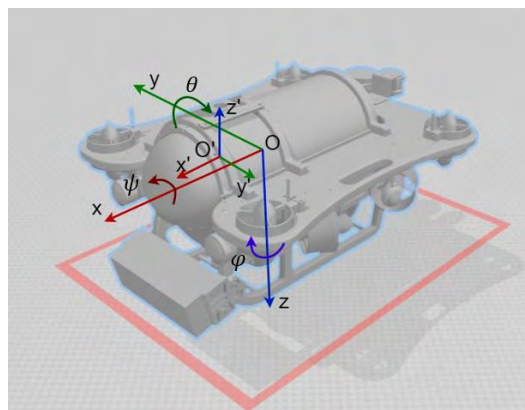


Рис. 5. Системы координат модуля Pololu IMU (O') и система координат ПА (O)

составляющие кватерниона; $\text{atan2}()$ - функция, обеспечивающая вычисление арктангенса с учетом принадлежности аргумента соответствующему квадранту.

В рабочем режиме ядро Core 0 занимается обменом данных с компьютером, создавая 4 топика, в которые отправляются полученные от датчиков данные (издатели):

- /Imu1_raw_data – топик, в который публикуются данные об ускорениях и угловых скоростях;
- /Compass – данные угла курса с компаса.
- /Imu1_orientation – данные углов ориентации аппарата;
- /Depth – данные от датчика глубины.

Тяга каждого двигателя может быть найдена из выражения $P = R^+T$, где вектора T и P – вектора желаемых сил и моментов и необходимых тяг двигателей, R^+ – псевдообратная матрица к R , описывающей связь $T = RP$. Исходя из конфигурации двигателей ГНПА (рис. 6), матрица R с учетом геометрических параметров движительного комплекса будет иметь вид (2). При подстановке числовых значений получена матрица R и рассчитана псевдообратная матрица R^+ . Указанные выражения используются для расчёта тяг, которые необходимо создать каждым двигателем аппарата. В качестве исполнительных устройств в ГНПА используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, управление которыми происходит с помощью электронных регуляторов скорости (ESC – electronic speed controller), на вход которых подаются импульсные программные сигналы, длительность которых задает желаемую скорость вращения.

Переход от тяги, развиваемой двигателем, к программному сигналу управления происходит с помощью швартовой характеристики, полученной с помощью аппроксимации экспериментальных данных тяги двигателя в обоих направлениях. Указанная зависимость имеет вид многочлена третьего порядка:

$$U = 0.5045P^3 - 6.353P^2 + 64.059P + 1520.2, \text{ если } P > 0, \\ U = 1.1866P^3 + 12.976P^2 + 86.193P + 1471.3, \text{ если } P < 0,$$

где U – управляющий сигнал, формирующийся контроллером, P – желаемая тяга двигателя.

Описание системы, запускаемой на микрокомпьютере LattePanda

Микрокомпьютер работает под управлением операционной системы Xubuntu 22.04 LTS с установленным пакетом ROS2 humble. Микрокомпьютер автоматически после загрузки устанавливает связь с микроконтроллером с помощью библиотеки microROS.

Для реализации системы на микрокомпьютере автоматически при включении запускаются все компоненты, необходимые для работы системы (рис. 7). Для каждого датчика выделены свои узлы, которые осуществляют связь с оборудованием, подключенным к компьютеру и предоставляющие данные в топик ROS2:

- IMU2_Node – Узел, предоставляющий данные от ИИМ ГKB-5;
- ZED_Node – предоставляет данные от ZED камеры;
- Camera_Node – предоставляет данные от WEB камеры;
- EchoSunder_Node – предоставляет данные от датчика высоты над грунтом Ping Sonar.

Порядок выполнения миссии контролируется узлом MissionManager_Node, который с помощью инструмента action поочередно запускает выполнение команд. Команды для выполнения должны быть заранее загружены оператором в файл миссии, или предоставлены в топик /Mission. Миссия представляет собой набор последовательно выполняемых элементарных команд. Выполнение

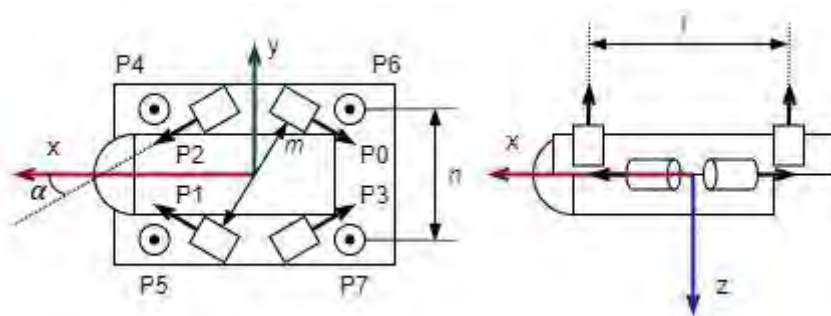


Рис. 6. Схема движительного комплекса АНПА

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\cos(\alpha) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & -\sin(\alpha) & \sin(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{n}{2} & \frac{n}{2} & \frac{n}{2} & \frac{n}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{2} & \frac{l}{2} & -\frac{l}{2} & -\frac{l}{2} \\ -\frac{m}{2} & -\frac{m}{2} & \frac{m}{2} & \frac{m}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

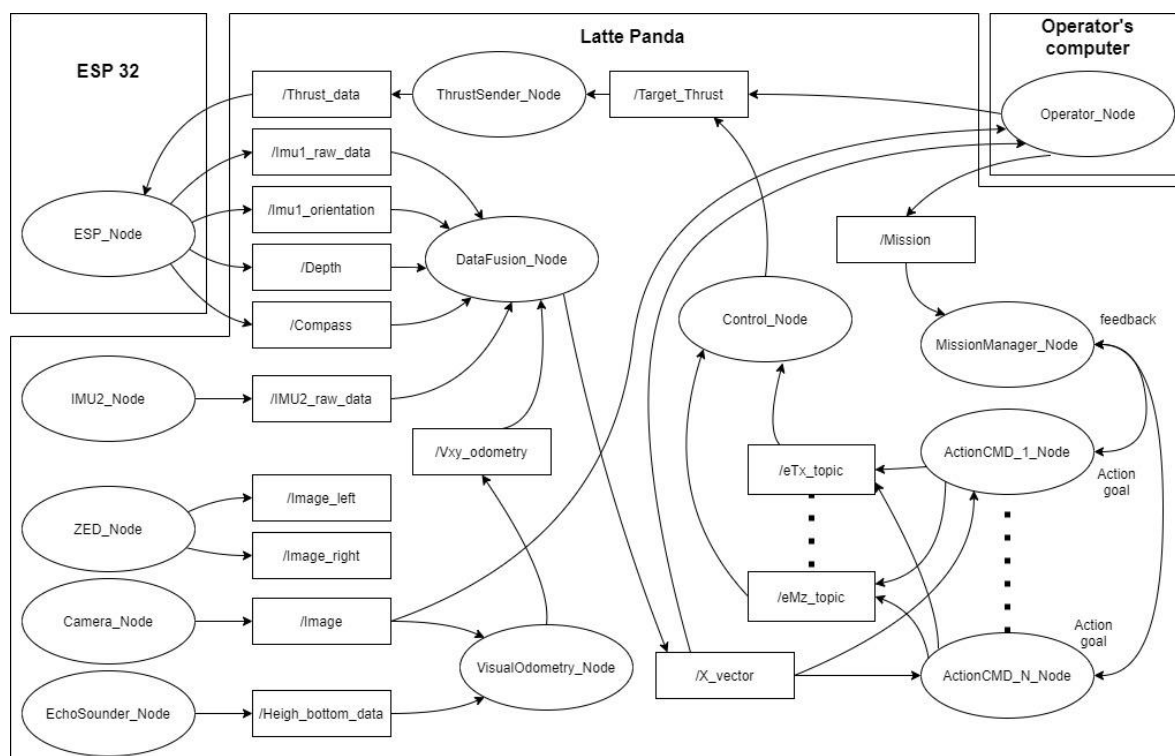


Рис. 7. Граф узлов ROS2

команд осуществляется отдельными для каждого вида команд узлами, которые регламентируют и контролируют работу аппарата в процессе работы. После завершения выполнения заданной команды MissionManager вызывает следующую по списку команду.

Система управления ГНПА по положению и ориентации реализована с использованием типовых ПИД регуляторов и представляет собой узел `Control_Node`, обеспечивающий выработку желаемого вектора сил и моментов на основе соответствующих ошибок. Коэффициенты типовых регуляторов записаны в конфигурационном файле и загружаются в узел при запуске. Узел `DataFusion_Node` собирает данные от датчиков аппарата и формирует единый вектор состояния, который в дальнейшем используется в остальных расчетах.

Для обеспечения стабилизации подводного аппарата по глубине и углам крена и дифферента в рамках системы, описанной выше необходимо создание узла для выполнения команды стабилизации. Данный узел должен иметь возможность начинать и заканчивать свою работу по команде оператора или узла `Mission_Manager_Node`.

Для реализации системы стабилизации был создан узел `ZwxwyStable_Node`, задачами которого является вычисление ошибок между желаемыми величинами глубины и углов крена и дифферента. В качестве входных данных о текущем состоянии рассматриваемых величин узел принимает данные с топиков `/Depth` и `/imu1_orientation`, желаемые

значения узел принимает из топиков `/Target_depth` и `/Target_orientation`.

Включение и отключение стабилизации реализовано с помощью ROS2 Service, что позволяет включить или выключить стабилизацию как из консоли оператора, так и из любого узла системы. При включении стабилизации узел считывает текущую глубину и ориентацию аппарата, после чего сохраняет их в качестве желаемых. Значения желаемой глубины и ориентации в дальнейшей работе может быть изменено публикацией в соответствующий топик.

Описание интерфейса оператора

Графическое окно тестового интерфейса оператора показано на рисунке 8а. Интерфейс позволяет оператору выбирать режим работы подводного аппарата и задавать параметры, которые необходимо стабилизировать и получать изображение от бортовой камеры, установленной на аппарате. Для управления аппаратом используется геймпад PS2 с аналоговыми курками. Схема задействованных органов управления показана на рисунке 8б. Цифрами на рисунке 8а обозначены элементы интерфейса: 1 – включение/выключение режима стабилизации; 2 – включение/выключение управления с пульта управления; 3 – выбор осей стабилизации; 4 – кнопка аварийного выключения; 5 – Выбор целевых значений стабилизации; 6 – окно изображений камеры; 7 – окно ввода текстовых команд.

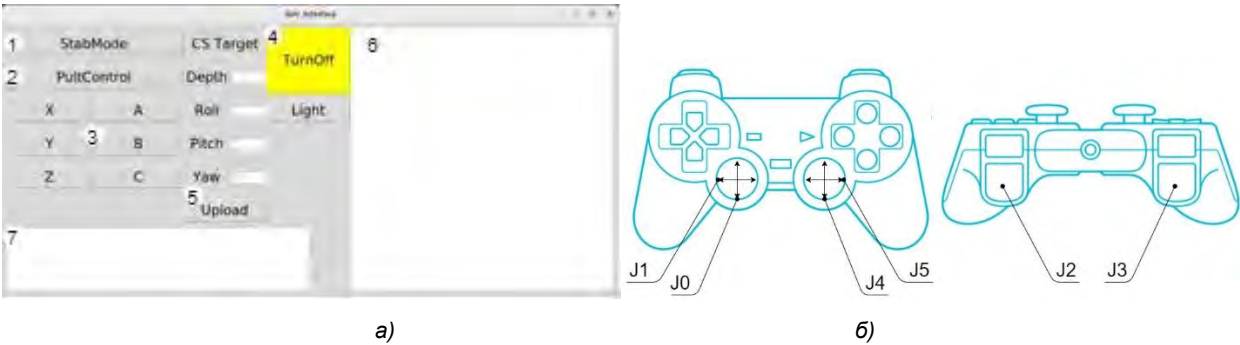


Рис. 8. Графическое окно интерфейса оператора (а) и устройства управления (б)

На рисунке 8б J0 - J5 – аналоговые органы управления джойстика. Формирование управляющих воздействий с помощью этого геймпада происходит согласно законам, представленным в таблице 2.

Таблица 2

Команды телеуправления

Контролируемая ось	Расчетная формула
Tx	$T_{x\max} \cdot J_4$
Ty	$-T_{y\max} \cdot J_5$
Tz	$T_{z\max} \cdot \frac{(J_3 - J_2)}{2}$
My	$M_{y\max} \cdot J_0$
Mz	$-M_{z\max} \cdot J_1$

Исследование работы предложенной системы

Для проверки работоспособности реализованной ИУС были проведены тесты, позволяющие подтвердить желаемые частоты работы узлов. Для этого система запускалась в различных режимах, таким образом, чтобы были задействованы все основные узлы системы. Считалось, что частота работы отдельного компонента соответствует частоте публикации сообщений этим компонентом. Данные измерений были получены с помощью стандартных средств ROS2 и представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты измерения частоты работы узлов ИУС

Название узла	Требуемая частота работы	Реальная частота работы
ESP Node	20 Гц	27 Гц
Thrust Sender	20 Гц	20 Гц
Control Node	20 Гц	23 Гц
ZwxwyStable Node	20 Гц	28 Гц
P2Pmove Node	20 Гц	20 Гц
Operator Node	20 Гц	20 Гц

Для проверки корректности функционирования разработанной ИУС было выполнено полунатурное моделирование в среде трехмерного моделирования CoppeliaSim. В процессе моделирования использовалась разработанная ИУС, которая сопрягалась со средой CoppeliaSim с помощью соответствующих топиков ROS2: ИУС публиковала топик с сигналами управления, а CoppeliaSim топики с данными от бортовых датчиков. В среде CoppeliaSim была реализована модель ГНПА, динамические характеристики которой соответствовали реальному аппарату (рис. 9).

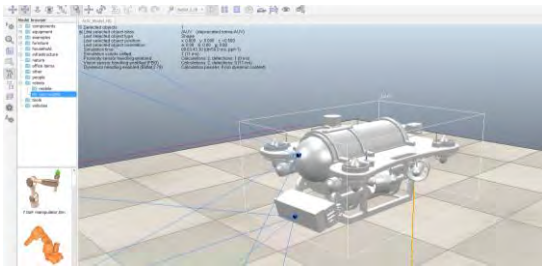


Рис. 9. Вид модели в CoppeliaSim

Для теста ИУС в режиме телеуправления аппарат с пульта управления получал сигналы, формируемые органами управления (рис. 10). Полученные сигналы пересчитывались компьютером аппарата в сигналы управления двигателями и передавались в среду CoppeliaSim, где происходило моделирование движения ГНПА.

В процессе проверки режима телеуправления аппарат под управлением оператора прошел по произвольной траектории, показанной на рисунке 11. Из представленных результатов видно, что формирование управляющих сил и моментов двигательным комплексом на основе сигналов от пульта управления происходит корректно и обеспечивает ГНПА управляемость.

С помощью моделирования так же была проверена способность системы выполнять заданные миссии в автономном режиме. Для этого была сформирована миссия, состоящая из команд прямолинейного движения (табл. 4), которая была запущена на бортовом компьютере аппарата. Траектории движения ГНПА в автономном режиме показана на рисунке 12.

Таблица 4

Заданная миссия

Команда	целевая точка, (м,м,м)	Точность,м
P2Pmove	(10,0,1)	0.2
P2Pmove	(10,3,1)	0.2
P2Pmove	(-10,3,1)	0.2
P2Pmove	(-10,6,1)	0.2
P2Pmove	(10,6,1)	0.2

Как видно из представленного рисунка ИУС ГНПА выполнила заданную миссию с требуемой точностью. Более того, был проведен эксперимент с тестовым погружением подводного аппарата в Амурском заливе г. Владивосток, в ходе которого была проверена работа ИУС в режиме телеуправления в реальных условиях, где ИУС доказала свою работоспособность (рис.13).

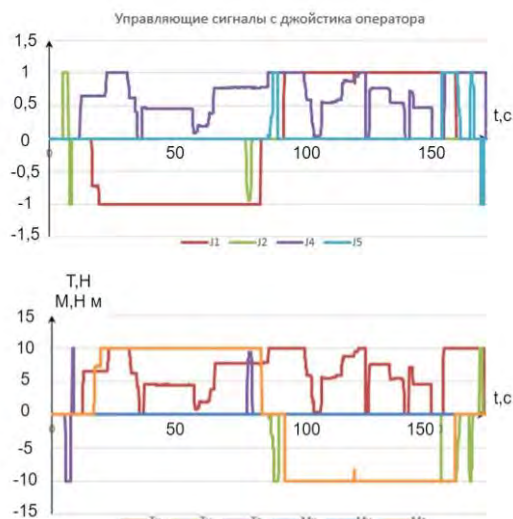


Рис. 10. Управляющие сигналы с джойстика оператора и соответствующие им упоры движительного комплекса

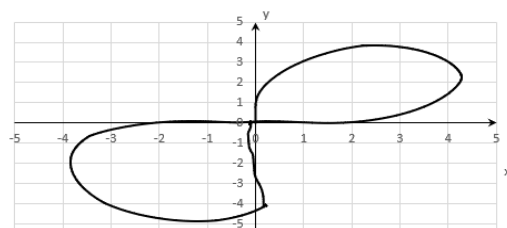


Рис. 11. Траектория движения ГНПА в режиме телеуправления

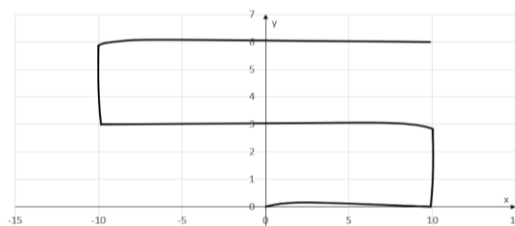


Рис. 12. Траектория движения ГНПА в автономном режиме



Рис. 13. Проверка работы ИУС в акватории Амурского залива, г. Владивосток

Заключение

Разработанная в статье ИУС может быть реализована для разных типов НПА. В частности, предложенная архитектура ИУС была реализована и проверена на гибридном НПА – МГГА-7ДФ. ИУС позволяет выполнять операции в автономном и телеуправляемом режиме, а использование платформы ROS2 позволяет легко дорабатывать ее функционал. В ходе проведенных исследований ИУС показала свою эффективность и работоспособность.

Литература

1. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток., изд. «Дальнаука», 2016, 400 с.
2. Черненко К.В., Молчанов А.В., Егоров С.А., Куценко А.С. Особенности построения информационно-управляющей системы телеуправляемого подводного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение", 2012, Спец. вып. Специальная робототехника, С. 65-74.
3. Юхимец Д.А., Губанков А.С. Навигационная система автономного подводного аппарата на основе данных, передаваемых по акустическому каналу от гидроакустической станции // Известия ЮФУ. Технические науки, 2023, №1, С. 227-240, <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-227-240>.
4. Zhou J., Zhao X., Chen T., Yan Z., Yang Z. Trajectory Tracking Control of an Underactuated AUV Based on Backstepping Sliding Mode with State Prediction // IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 181983-181993, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958360>.
5. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Информационно-управляющая система для мобильных роботов // Автометрия, 2015, Т. 51, №5, С. 92-100.
6. Martin J., et al. A Generic ROS-Based Control Architecture for Pest Inspection and Treatment in Greenhouses Using a Mobile Manipulator // IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 94981-94995, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093978>.
7. Mori H., et al. Design and Implementation of ROS2-based Autonomous Tiny Robot Car with Integration of Multiple ROS2 FPGA Nodes // International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT), Hong Kong, 2022, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ICFPT56656.2022.9974433>.
8. Hong S. M., Nam K. S., Ryu J. D., Lee D. G., Ha K. N. Development and Field Test of Unmanned Marine Vehicle (USV/UUV) With cable // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 193347-193355, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032163>.
9. Madgwick S.O.H., Harrison A. J. L., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975346>.
10. Fossen Thor I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, 575 pp.
11. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.M. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. // IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(5), pp. 1203-1217, <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738>.

References

1. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniya skorostnym dvi-zheniem i stabilizatsiei podvodnykh apparatov v prostranstve. [Features of synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space] Vladivostok., izd. «Dal'nauka», 2016, 400 s.
2. Chernenko K.V., Molchanov A.V., Egorov S.A., Kucenko A.S. Osobennosti postroeniya informacionno-upravlyayushhej sistemy teleupravlyаемого podvodnogo apparata. [Features of building an information-control system of a remote-controlled underwater vehicle] *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. "Mashinostroyeniye"*, 2012, Spec. vyp. *Special'naya robototekhnika*, S. 65-74.
3. Yukhimets D.A., Gubankov A.S. Navigatsionnaya sistema avtonomnogo podvodnogo apparata na osnove dannykh, peredavaemykh po akusticheskomu kanalu ot gidroakusticheskoy stantsii. [Navigation system of an autonomous underwater vehicle based on data transmitted with an acoustic channel from a hydroacoustic station.] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2023, №1, S. 227-240, <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-227-240>.
4. Zhou J., Zhao X., Chen T., Yan Z., Yang Z. Trajectory Tracking Control of an Underactuated AUV Based on Backstepping Sliding Mode with State Prediction. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 181983-181993, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958360>.
5. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E.Sh. Informatsionno-upravlyayushchaya sistema dlya mobil'nykh robotov. [Information-control system for mobile robots] *Avtometriya*, 2015, T. 51, №5, S. 92-100.
6. Martin J., et al. A Generic ROS-Based Control Architecture for Pest Inspection and Treatment in Greenhouses Using a Mobile Manipulator. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 94981-94995.
7. Mori H., et al. Design and Implementation of ROS2-based Autonomous Tiny Robot Car with Integration of Multiple ROS2 FPGA Nodes. *International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT)*, Hong Kong, 2022, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ICFPT56656.2022.9974433>.
8. Hong S. M., Nam K. S., Ryu J. D., Lee D. G., Ha K. N. Development and Field Test of Unmanned Marine Vehicle (USV/UUV) With cable. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 193347-193355, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032163>.
9. Madgwick S.O.H., Harrison A. J. L., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland*, 2011, pp. 1-7.
10. Fossen Thor I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, 575 p.
11. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.M. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(5), pp. 1203-1217, <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юхимец Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор департамента автоматизации и робототехники, Дальневосточный Федеральный университет, 690922, г.Владивосток, о. Русский, п.Аякс, 10 e-mail: yukhimets.da@dvvu.ru

Белюсов Михаил Дмитриевич, стажер-исследователь, Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, e-mail: belousov.md@students.dvvu.ru

Губанков Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, заведующий лабораторией морской беспилотной авиации и морских авиационных систем, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а, e-mail: gubankov@dvo.ru

Dmitry A. Yukhimets, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of automation and robotics of Far Eastern Federal University, 10, Ajacs, Russian isl., Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: yukhimets.da@dvvu.ru

Mikhail D. Belousov, Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5a, e-mail: belousov.md@students.dvvu.ru

Anton S. Gubankov, PhD (Eng.), Associate Professor, senior scientist Institute of Automation and control processes FEB RAS, Head of laboratory of marine unmanned aviation and marine aviation systems, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 50a, Verhneportovaya str., Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: gubankov@dvo.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 27.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 31.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.11.2023.

Научная статья

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.019>**Автоматическое выравнивание яркости эхограмм гидролокатора бокового обзора**Павин А.М.^{1,2} pavin@bk.ru, Ходоренко М.С.¹ max@marine.febras.ru¹Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук, ²Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. В работе рассматриваются методы выравнивания яркости эхограмм гидролокатора бокового обзора (ГБО) с целью получения гидролокационных изображений морского дна, обладающих равномерной плотностью во всей полосе съемки. Задача решается в контексте обнаружения локальных донных неоднородностей на гидроакустических снимках морского дна человеком-оператором или алгоритмами автоматического выделения объектов. Приводятся результаты применения известных методов обработки фотоизображений с целью обработки эхолокационных снимков. Предлагается новый метод выравнивания яркости эхограмм, обладающий значительно меньшей ресурсоемкостью, в сравнении с известными методами выравнивания яркости на фотоизображениях. Приводятся результаты сравнительных экспериментов с использованием различных подходов решения данной задачи. Оцениваются особенности применения нового метода коррекции яркости эхограмм, пригодного для применения на борту автономного необитаемого подводного аппарата в режиме реального времени с учетом вычислительных и энергетических ограничений автономного робота.

Ключевые слова: выравнивание яркости, гидролокатор, ГБО, акустические эхограммы, гидролокационная съемка, подводная инспекция.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/> (в части разработки алгоритма последовательной обработки эхосигнала гидролокационных средств и способа применения алгоритма к построению формирующимся гидролокационным изображениям) и за счет средств государственного задания ИПМТ ДВО РАН (в части исследования и разработки принципов создания multifunctional робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана).

Для цитирования: Павин А.М., Ходоренко М.С. Автоматическое выравнивание яркости эхограмм гидролокатора бокового обзора. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 153—160. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.019

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.019>**Automatic Brightness Equalization of Side-Scan Sonar Echograms**Alexander M. Pavin^{1,2} pavin@bk.ru, Maxim S. Khodorenko¹ max@marine.febras.ru¹Federal State Budgetary Institution of Science M. D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences, ²Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Automation and Control Processes Far East Branch Russian Academy of Sciences

Abstract. The paper considers methods for leveling the brightness of side-scan sonar (SSS) echograms in order to obtain sonar images of the seabed that have a uniform density over the entire survey strip. The problem is solved in the context of local bottom objects detection on hydroacoustic images by a human operator or automatic algorithms. The results of known methods of photographic images processing for the purpose of processing echolocation images are presented. A new method for brightness equalizing of echograms is proposed, which has much lower resource intensity in comparison with the known methods for equalizing the brightness in photographic images. The results of comparative experiments using various approaches to solving this problem are presented. The features of the application of a new method for correcting the brightness of echograms are evaluated, taking into account the computational and energy limitations of an autonomous robot.

Key words: brightness equalization, sonar, SSS, acoustic echograms, sonar survey, underwater inspection.

Financial Support: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/> (in terms of the development of an algorithm for sequential processing of the echo signal of sonar equipment and the method of applying the algorithm to line-by-line sonar images) and at the expense of the state task of the IPMT FEB RAS (in terms of research and development of principles for creating multifunctional robotic systems for the study and development of the World Ocean).

For citation Alexander M. Pavin, Maxim S. Khodorenko Automatic Brightness Equalization of Side-Scan Sonar Echograms. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 153—160. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.019

Введение

Гидролокаторы бокового обзора (ГБО) широко используются в составе автономных и буксируемых робототехнических комплексов для получения информации о характере донной поверхности, а также о расположенных на ней объектах естественного и искусственного происхождения. Существует класс задач, где необходима коррекция (выравнивание) яркости или контрастности исходной эхограммы, полученной с гидролокатора бокового обзора. К таким задачам относятся:

- разработка методов и алгоритмов обнаружения объектов определенной формы на гидролокационных изображениях для решения задач обследования подводной инфраструктуры [1];
- построение мозаики (сшивки) акустических снимков с целью обнаружения локальных донных неоднородностей на гидроакустических снимках морского дна [2, 3];
- получение изображений подводных объектов, отснятых под разными ракурсами в различных условиях и картографирование [4];
- получение исходных данных и обучающих выборок изображений морского дна с расположенными на нем объектами искусственного и естественного происхождения;
- настройка алгоритмов распознавания на обучающих выборках гидролокационных изображений, предварительно выровненных по яркости и контрастности;
- разработка алгоритмов работы автономных подводных роботов по обнаружению и траекторному обследованию подводных объектов;
- применение сверточных нейронных сетей для решения задачи классификации образов на гидроакустических снимках и др.

В свою очередь известно, что яркость сигнала эхограммы гидролокатора бокового обзора уменьшается по экспоненциальному закону вдоль строки с удалением по времени. Таким образом, результирующее изображение эхограммы имеет ярко выраженный градиент яркости по дальности вдоль строки. Мозаика, построенная с использованием таких эхограмм, имеет низкое визуальное восприятие, плохо читабельна и нерепрезентативна (рис. 1-а, б – завалы яркости в левом и правом крае изображения). Кроме того, неравномерная средняя яркость и низкая контрастность изображения эхограммы ГБО препятствует корректному и эффективному выделению объектов алгоритмами распознавания [5, 6].

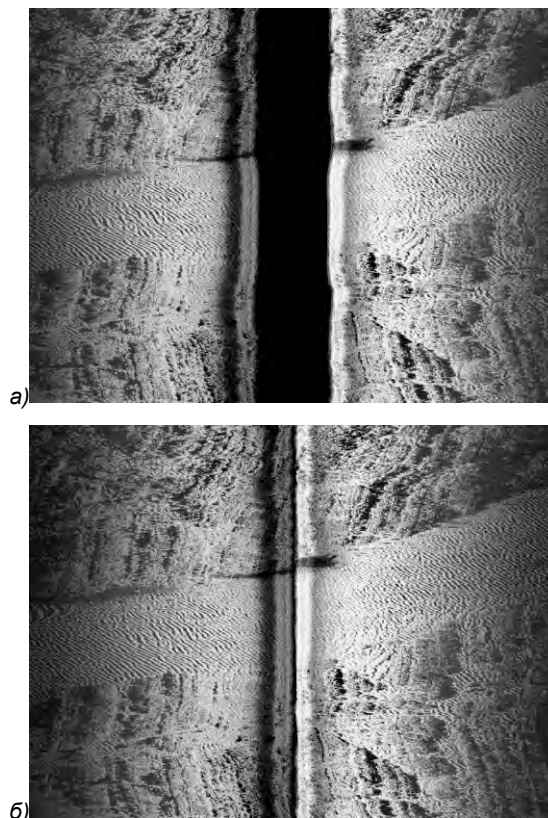


Рис. 1 – Эхолокационное изображение гидролокатора бокового обзора: а) исходное с «водяным столбом» (дистанцией до грунта) в центре; б) спроецированное на плоскость дна

Во многих действующих образцах гидролокаторов первоначально закон усиления вдоль строки подбирается вручную, но на результирующую яркость и ее равномерность также оказывает большое влияние ряд динамических факторов, таких как тип грунта, уклон дна, боковые лепестки диаграммы направленности приемопередающих антенн и т.п. Боковые лепестки (рис. 1-б – засветки и затенения по левому и правому борту от центра изображения) представляют особую сложность при решении задачи автоматического выравнивания яркости. Данные изменения обладают локальной неоднородностью изменения яркости в очень малой окрестности, сравнимой с размерами объектов на изображении. В связи с этим разработка методов автоматического выравнивания яркости имеет большое значение при визуализации и обработке эхограмм гидролокатора бокового обзора.

1. Обзор существующих методов

методом формирования закона временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) сигнала является метод, основанный на формировании регулирующего напряжения на заряде конденсатора. Известно, что для ГБО потери

интенсивность эхосигнала с расстоянием пропорциональны десятичному логарифму этого расстояния [7]. Для компенсации этих потерь принятый эхосигнал во времени необходимо умножить на соответствующую этому закону обратную поправочную кривую. Простейшим аппаратным способом формирования подобного обратного закона регулировки является использование аналогового усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, регулирующее напряжение для которого формируется зарядной цепью на конденсаторе. Напряжение на конденсаторе при его заряде от источника с постоянным напряжением формируется по экспоненциальному закону. Подбором емкости конденсатора и сопротивлением резистора в цепи заряда можно изменять кривизну формируемого сигнала ВАРУ. В итоге на выходе регулируемого усилителя получается сигнал с условно постоянной во времени интенсивностью. Данный подход очень прост и требует минимальных аппаратных ресурсов, но, к сожалению, довольно груб и позволяет только скорректировать яркость пикселей на заранее известную (не меняющуюся) величину. В связи с этим, применение данного подхода зачастую ограничено регулировкой яркости в дальней зоне распространения сигнала [8].

Усовершенствованием вышеописанного метода на заряде конденсатора является метод формирования регулирующего напряжения ВАРУ с помощью сплайновых кривых. Сформированные предварительно оператором отсчеты сплайновой кривой ВАРУ загружаются в память контроллера и выводятся через цифро-аналоговый преобразователь на регулируемый усилитель. Этот подход более гибкий и позволяет получить лучшие результаты за счет формирования более точной кривой ВАРУ, частично учитывающей особенности конкретной аппаратной части, например, диаграммы направленности антенны. Однако итоговый результат остается далек от того, что требуется для целей мозаицирования изображения или распознавания объектов. Особенностью данного метода и метода на заряде конденсатора является то, что регулировка осуществляется за счет формирования аналогового управляющего напряжения для регулируемого аналогового усилителя с заранее известными характеристиками, что не позволяет учитывать динамические изменения яркости и контрастности акустической эхограммы конкретной сцены морского дна.

Заслуживает внимания метод построения закона ВАРУ методом «рекогносцировочного галса», описанный в [9]. Метод рассматривается в контексте использования ГБО на борту автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), совершающего прямолинейные параллельные проходы (галсы) для получения сплошного гидролокационного покрытия акватории заданной площади. Данный подход позволяет на этапе предварительного тестового галса получить статистически накопленную усредненную кривую ВАРУ с учетом свойств дна водоема, где производится гидролокационная съемка. Результат выравнивания яркости этим методом очень хорош для акваторий, на которых не происходит существенное изменение типа грунта на всей трассе

обследования. Одним из достоинств данного подхода является отсутствие «переходных эффектов» при резкой смене характера дна, свойственных системам с динамическим «оконным» усреднением яркости вдоль траектории. Из недостатков метода – снижение эффективности регулировки в условиях меняющегося характера дна или его уклона, а также необходимость проведения отдельных галсов для сбора статистики.

Часто используемым подходом коррекции яркости и контрастности фотоизображений является анализ и обработка гистограммы распределения полутонов. В частности, достаточно часто используется метод, основанный на выравнивании черной и белой точек фотоизображения. Суть метода заключается в вычислении яркости каждого пикселя с учетом пересчета диапазона яркостей на полный диапазон (для определенности далее ведется изложение для полного диапазона яркости 8 бит, т.е. 256 градаций серого). Для этих целей вычисляется гистограмма распределения полутонов и отбрасываются (приравниваются к черной или белой точке соответственно) краевые значения яркостей пикселей. Далее полученный диапазон яркостей $E^{\max}$ и $E^{\min}$ для данного окна пересчитывается на полный диапазон градаций палитры серого 0-255. Формула для вычисления нового значения яркости пикселя может быть выведена из следующего соотношения:

$$\frac{E_{i,j}}{E_{i,j}^{\max} - E_{i,j}^{\min}} = \frac{F_{i,j}}{255}, \quad (1)$$

где: $E_{i,j}$ и $F_{i,j}$ – исходные и результирующие яркости пикселя i -й строки и j -го столбца соответственно.

Применение данного метода и математического выражения (1) для всего гидролокационного изображения целиком (по аналогии с фотоизображением) практически не имеет смысла сразу по нескольким причинам:

- 1) во всем гидролокационном изображении практически всегда присутствует существенное количество «черных» и «белых» точек, поэтому финальный результат практически не отличается от исходного;
- 2) гидролокационное изображение появляется по принципу «строчка-за-строчкой» (не одномоментно), что не позволяет производить корректировку яркости и контрастности изображения в режиме реального времени в процессе проведения гидролокационной съемки.

По этим причинам обоснованное применение метода видится только в скользящем окне определенного размера. Поскольку ранее была поставлена цель выравнивания яркости изображения, как на краях эхограммы, так и на боковых лепестках, следовательно, ширина окна по своим размерам должна быть сопоставима с размером «убираемых» боковых лепестков. Высоту скользящего окна логично взять много большей ширины окна, т.к. в продольном направлении (вдоль линии перемещения гидролокатора) перепады яркости отражают только «полезные» изменения характера грунта.

На рис. 2-а приводится пример выровненного по яркости изображения со скользящим окном, приблизительно равным ширине бокового лепестка и высоте – в десять раз превышающей ширину. Здесь и далее исходными данными для обработки является эхограмма, спроецированная на плоскость дна (рис. 1-б). Можно видеть, что «в среднем» изображение стало более выровненным по яркости и контрастности (особенно заметно выравнивание темных участков в дальней эхолокационной зоне – рис. 1 и 2, левые и правые края изображений), однако боковые лепестки на изображении все же убрались не полностью.

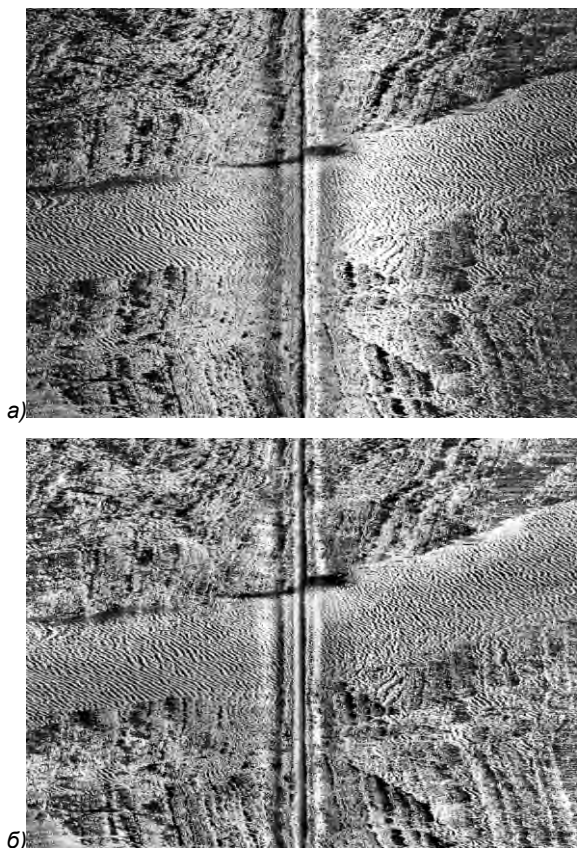


Рис. 2 – Пример выравнивания яркости и контрастности эхограммы методом выравнивания черной и белой точек (а) и методом кумулятивной гистограммы (б)

Из недостатков данного подхода, прежде всего, следует отметить высокие вычислительные требования, что практически исключает его применение для обработки гидролокационных изображений в режиме реального времени на бортовых малоомощных вычислителях АНПА с низкими энергетическими затратами. Вычислительная сложность описанного алгоритма определяется размером всего изображения и размером скользящего окна следующим образом: $O(w_{img} \cdot h_{img} \cdot w_{win} \cdot h_{win})$, где w_{img} и h_{img} – ширина и длина эхограммы в пикселях соответственно, w_{win} и h_{win} – ширина и длина скользящего окна. Данная вычислительная сложность характерна для большинства методов выравнивания яркости эхограмм ГБО, изначально предназначенных для обработки фотоизображений [10, 11]. Учитывая, что w_{img} в зависимости модели гидролокатора и

дальности съемки составляет тысячи пикселей, h_{img} – превышает десятки тысяч за час работы гидролокатора, w_{win} – около десятка пикселей, а h_{win} – на порядок-два больше, чем w_{win} , то на практике получается, что постобработка нескольких гигабайт отснятой гидролокационной информации в реальных морских поисковых условиях практически невозможна. Кроме того, как указывалось выше, метод не позволяет полностью компенсировать неравномерность диаграммы направленности антенны в ближней зоне (темные и светлые полосы в центральной части вышеприведенных эхограмм).

Еще одним известным способом выравнивания яркости и увеличения контрастности является метод кумулятивной гистограммы [12]. Метод во многом похож на выравнивание черной/белой точек и основан на пересчете яркости каждого пикселя на полный диапазон градации палитры серого с помощью нормализованной кумулятивной гистограммы. Данный подход успешно применяется в обработке фотоизображений, где расчет яркости и контрастности осуществляется одновременно для всего изображения. Применительно к эхограммам гидролокатора бокового обзора метод обладает всеми перечисленными недостатками, что и метод выравнивания черной/белой точек. Результаты обработки эхолокационных снимков ГБО этим методом также аналогичны (см. рис. 2-б).

Для решения задачи выравнивания яркости эхограммы необходимо определиться с признаками донных объектов (пространство признаков), по отношению к которым преобразование яркости останется инвариантным. Логично допустить, что в контексте решения задачи мозаичирования, а также задачи обнаружения подводных объектов автоматическими средствами, расстояние (мера близости) на котором изменение яркости эхолокационного снимка является существенным, составляет менее метра. Т.е. плавные изменения яркости за дистанцию, превышающую этот порог относительно не существенны ни для человеческого глаза, ни для автоматики, и могут быть скомпенсированы алгоритмом. Следует отметить, что естественное затухание эхосигнала с дальностью вдоль строки по левому и правому борту (рис. 1) составляет десятки метров и, как видно из анализа работы рассмотренных алгоритмов (рис. 2) легко компенсируется. Сложнее обстоит дело с «боковыми лепестками» антенн ГБО, т.к. их размер в поперечном направлении (перпендикулярно перемещению гидролокатора) может быть сопоставим с геометрическими характеристиками объектов морского дна, что хорошо видно на рис. 1 и 2 (темные и светлые вертикальные полосы возле центра изображения). Таким образом, достаточно сложно выделить универсальные критерии оценки параметров типичных локальных объектов, которые не должны исказиться во время выравнивания яркости изображения. Однако из анализа исходной ГБО-эхограммы (рис. 1) можно отметить, что статичная составляющая яркости слабо меняется для одинаковой наклонной дистанции от строки к строке (по вертикали изображения). Данное свойство было использовано во время разработки алгоритма выравнивания яркости эхограмм, позволяющего сохранить набор специфичных характеристик (черт) объектов морского дна.

2. Выравнивание яркости эхограммы методом экспоненциального скользящего среднего

С учетом выше изложенного был разработан метод, сочетающий в себе высокую эффективность и низкую алгоритмическую сложность. Суть метода заключается в накоплении средней яркости (экспоненциальное взвешенное скользящее среднее) по текущему столбцу пикселей (вдоль траектории следования) с учетом весовых коэффициентов для текущего пикселя, пикселей небольшой окрестности и накопленной вдоль столбца средней яркости:

$$F_{i,j} = \text{sat}(E_{i,j} - A_{i,j} + 127, 0, 255), \quad (2)$$

$$A_{i,j} = \sum_{k=-K}^K (W_{0,k+K} E_{i,j+k} + W_{1,k+K} A_{i-1,j+k}), \quad (3)$$

где: $A_{i,j}$ – экспоненциальное взвешенное скользящее среднее с центральной точкой окна в i -й строке и j -м столбце эхограммы ГБО; $W_{0,k}$ – весовые коэффициенты применения яркости в текущей точке с отклонением k пикселей в строке; $W_{1,k}$ – весовые коэффициенты применения накопленной яркости с отклонением k пикселей в строке; $K=(w_{win}-1)/2$ – половина ширины скользящего окна; нумерация строк и столбцов матриц приведена «от нуля».

Коэффициенты матрицы W в нулевой строке («вклад» в среднюю яркость текущих пикселей) выбираются на один-два порядка меньше значений коэффициентов средней накопленной яркости (первая строка матрицы W). В усредненную яркость для текущего пикселя также попадают накопленные яркости по соседним столбцам k с небольшими весовыми коэффициентами. В результате, наибольший вклад в усредненную яркость вносит накопленная сумма по столбцу, а вклад яркости текущего пикселя и соседних столбцов незначительны, но позволяют «сгладить» среднее взвешенное значение яркости по горизонтали (поперек траектории следования). Сумма всех весовых коэффициентов матрицы W равна единице. Результирующее значение каждого пикселя вычисляется путем вычитания из его текущего значения усредненной яркости и прибавкой единого для всех смещения, соответствующего желаемой средней яркости изображения.

Большим преимуществом алгоритма является его простота и нетребовательность к вычислительным ресурсам и памяти. В результате чего, алгоритм может быть использован даже для обработки эхограмм на маломощных энергоэффективных вычислителях в режиме реального времени. В частности, вычислительная сложность алгоритма оценивается как $O(W_{img} \cdot h_{img} \cdot w_{win})$, что на несколько порядков меньше сложности рассматриваемых ранее методов. На рис. 3-5 приведен результат работы описанного метода экспоненциального взвешенного скользящего среднего с различными коэффициентами матрицы W . Подбор весовых коэффициентов позволяет в широких пределах варьировать зоной усреднения, шириной конуса усреднения и ретроспективностью вдоль траектории, что в конечном итоге позволяет получить требуемые эффекты фильтрации, такие как

компенсация неравномерности диаграммы направленности ГБО-антенны.

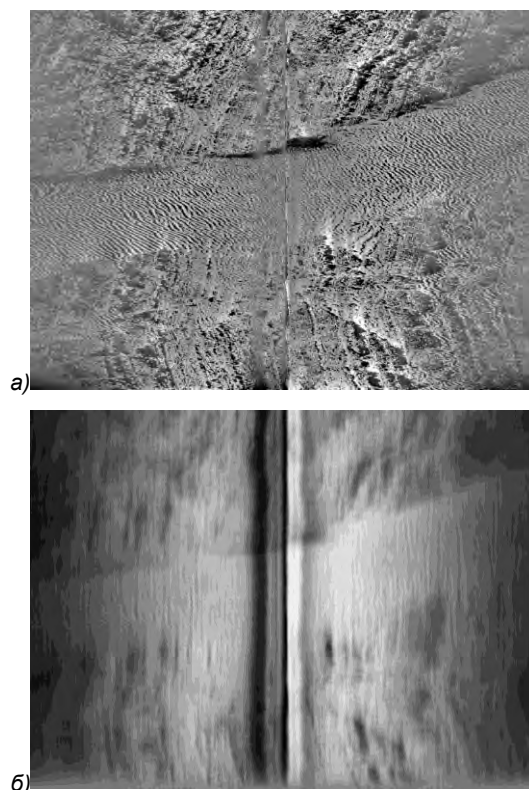


Рис.3 – Выравнивание яркости со значениями $W=[0,001; 0,001; 0,001]; [0; 0,97; 0]$: а) результирующее изображение б) усредненная яркость

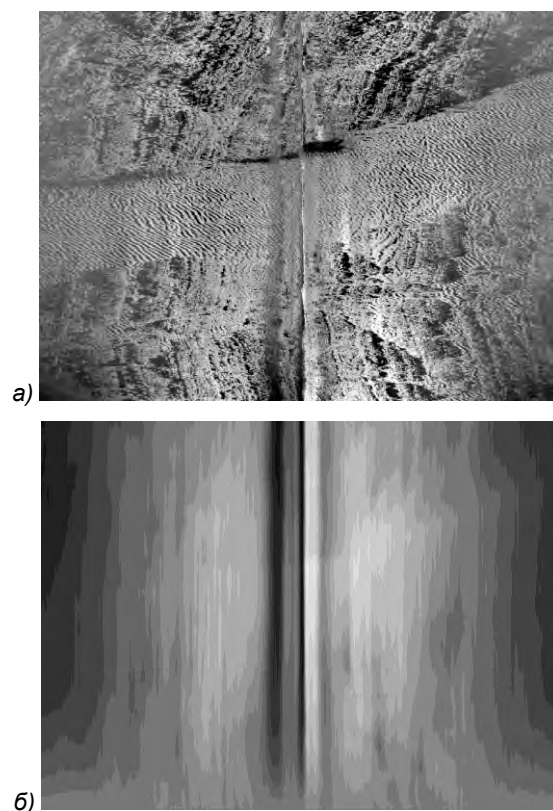


Рис. 4 – Выравнивание яркости со значениями $W=[0,002; 0,002; 0,002]; [0; 0,994; 0]$: а)

результатирующее изображение б) усредненная яркость

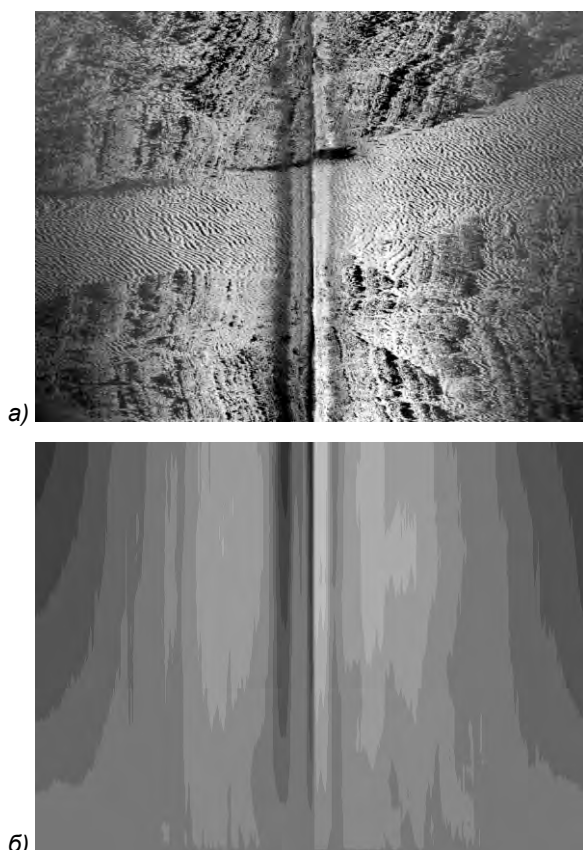


Рис. 5 – Выравнивание яркости со значениями $W=[0,0005; 0,0005; 0,0005; 0; 0,9985; 0]$:
а) результирующее изображение б) усредненная яркость

В частности, на рис. 3-а хорошо видно, что в нижней части изображения (первые строки эхограммы) пока не сформировалось средневзвешенное значение – отчетливо видны боковые лепестки диаграммы направленности антенны (светлые и темные участки вдоль траектории следования). Однако спустя примерно 5% высоты изображения (отсчитывая снизу-вверх) боковые лепестки существенно подавляются и далее имеют только редкие проявления, объясняемые неровностями проецирования эхограммы на горизонтальную плоскость. На рис. 4-а и рис. 5-а данный эффект более затянут во времени за счет применения больших коэффициентов в первой строке матрицы W в сравнении с нулевой строкой. Эффект накопления экспоненциального среднего хорошо прослеживается на изображении матрицы усредненной яркости $A_{i,j}$ (рис. 3-б).

Для оценки эффективности применения описанного метода коррекции яркости эхограмм были проведены эксперименты по обработке эхолокационных данных на бортовых вычислителях, часто применяемых в составе современных автономных мобильных систем, в т.ч. АНПА. В частности, эксперименты с использованием энергетически эффективных вычислителей Jetson Nano компании Nvidia показали, что разработанный метод пригоден для функционирования в режиме реального времени и может быть применен на борту АНПА с учетом вычислительных и энергетических ограничений автономного робота.

Заключение

По результатам проведенных экспериментов можно заключить, что среди рассмотренных методов именно реализация метода экспоненциального скользящего среднего является наиболее подходящей для автоматического выравнивания яркости эхограмм ГБО. К достоинствам описанного подхода можно отнести тот факт, что предложенный алгоритм не изменяет геометрических характеристик донных объектов естественного и искусственного происхождения, что позволяет обрабатывать эхолокационные снимки в режиме реального времени на борту автономного подводного робота. После использования описанной процедуры в системах технического зрения подводных роботов и системах постобработки данных можно ожидать существенное повышение качества мозаичированных изображений и качества обнаружения объектов заданной формы автоматическими средствами. В частности, видится возможным применение сверточных нейронных сетей для решения задачи классификации образов, т.к. в процедуре выравнивания яркости учтена основная (негативная) специфика получения гидролокационных изображений по принципу «строчка-за-строчкой» и дальнейшая обработка эхограмм может производиться по аналогии с распознаванием фотоизображений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/> (в части разработки алгоритма последовательной обработки эхосигнала гидролокационных средств и способа применения алгоритма к построению формирующимся гидролокационным изображениям) и за счет средств государственного задания ИПМТ ДВО РАН (в части исследования и разработки принципов создания многофункциональных робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана).

Литература

1. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications / Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev, In-Tech Publishers, Vienna, January, 2009, 582 pages, pp. 215-234, open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles.
2. Zhang, N.; Jin, S.; Bian, G.; Cui, Y.; Chi, L. A Mosaic Method for Side-Scan Sonar Strip Images Based on Curvelet Transform and Resolution Constraints. *Sensors* 2021, 21, 6044. <https://doi.org/10.3390/s21186044>.
3. Zhao, Jianhu & Shang, Xiaodong & Zhang, Hongmei. (2018). Side-Scan Sonar Image Mosaic Using Couple Feature Points with Constraint of Track Line Positions. *Remote Sensing*. 10. 953. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/953>.

4. Lucieer V.L., Forrest A.L. (2016) Emerging Mapping Techniques for Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) / Seafloor Mapping along Continental Shelves. Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments. Coastal Research Library, vol 13. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25121-9_2.
5. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселёв и др., под общ. ред. М.Д. Агеева; [отв. ред. Л.В. Киселёв]; Институт проблем морских технологий. – М.: Наука, 2005. – 398 с. – ISBN 5-02-033526-6.
6. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора / Приборы. 2009. №12. С. 43-50. ISSN 2071-7865.
7. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана / А. В. Богородский, Г. В. Яковлев, Е. А. Корепин, А. К. Должиков – Гидрометеиздат. Ленинград. 1984.
8. Золотарёв В.В., Инзарцев А.В., Ходоренко М.С. К вопросу о взаимном влиянии гидролокационных устройств при выполнении обзорно-поисковых работ группой автономных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2018. №. 1 (25). С. 19–21. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_03. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_03.
9. Агафонов И. Б., Золотарёв В. В., Мадисон Е. А. Подготовка гидролокационной информации для ее распознавания на борту АНПА / 5-я Всероссийская научно-техническая конференция "Технические проблемы освоения Мирового океана" 2013 года, г. Владивосток.
10. Ye, Xiufen & Yang, Haibo & Li, Chuanlong & Jia, Yunpeng & Li, Peng. (2019). A Gray Scale Correction Method for Side-Scan Sonar Images Based on Retinex. Remote Sensing. 11. 1281. 10.3390/rs11111281.
11. Камаев А.Н. Построение фотографических карт подводного дна на основе больших массивов изображений // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Хабаровск. 2014.
12. Samuel Samsudin. Introduction to Histogram Equalization for Digital Image Enhancement [Электронный ресурс]. URL: / <https://levelup.gitconnected.com/introduction-to-histogram-equalization-for-digital-image-enhancement-420696db9e43> (дата обращения 01.11.2022).

References

1. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications / Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev, In-Tech Publishers, Vienna, January, 2009, 582 pages, pp. 215-234, open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles.
2. Zhang, N.; Jin, S.; Bian, G.; Cui, Y.; Chi, L. A Mosaic Method for Side-Scan Sonar Strip Images Based on Curvelet Transform and Resolution Constraints. Sensors 2021, 21, 6044. <https://doi.org/10.3390/s21186044>.
3. Zhao, Jianhu & Shang, Xiaodong & Zhang, Hongmei. (2018). Side-Scan Sonar Image Mosaic Using Couple Feature Points with Constraint of Track Line Positions. Remote Sensing. 10. 953. 10.3390/rs10060953. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/953>.
4. Lucieer V.L., Forrest A.L. (2016) Emerging Mapping Techniques for Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) / Seafloor Mapping along Continental Shelves. Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments. Coastal Research Library, vol 13. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25121-9_2.
5. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies] / M.D. Ageev, L.V. Kiselev i dr., pod obshch. red. M.D. Ageeva; Institut problem morskikh tekhnologiy [Institute of Marine Technology Problems]. – М.: Nauka, 2005. – 398 p. – ISBN 5-02-033526-6.
6. Pavin A.M. Identifikatsiya podvodnykh protyazhennykh obektov na akusticheskikh snimkakh gidrolokatora bokovogo obzora [Identification of underwater extended objects on acoustic images of the side-scan sonar] / Priory [Instruments]. 2009. №12. P. 43-50. ISSN 2071-7865.
7. Gidoakusticheskaya tekhnika issledovaniya i osvoeniya okeana [Hydroacoustic technique for ocean research and development] / A. V. Bogorodskiy, G. V. Yakovlev, Ye. A. Korepin, A. K. Dolzhikov – Gidrometeoizdat. Leningrad. 1984.
8. Zolotarev V.V., Inzartsev A.V., Khodorenko M.S. K voprosu o vzaimnom vliyaniy gidrolokatsionnykh ustroystv pri vypolnenii obzorno-poiskovykh rabot gruppoy avtonomnykh podvodnykh robotov [On the issue of the mutual influence of sonar devices during survey and search work by a group of autonomous underwater robots] // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater research and robotics]. 2018. №. 1 (25). P. 19–21. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_03. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_03.
9. Agafonov I. B., Zolotarev V. V., Madison Ye. A. Podgotovka gidrolokatsionnoy informatsii dlya ee raspoznavaniya na bortu ANPA [Preparation of sonar information for its recognition on board the AUV] / 5-ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana" [5th All-Russian scientific and technical conference "Technical problems of the development of the World Ocean"] 2013. Vladivostok.
10. Ye, Xiufen & Yang, Haibo & Li, Chuanlong & Jia, Yunpeng & Li, Peng. (2019). A Gray Scale Correction Method for Side-Scan Sonar Images Based on Retinex. Remote Sensing. 11. 1281. 10.3390/rs11111281.
11. Kamaev A.N. Postroenie fotograficheskikh kart podvodnogo dna na osnove bolshikh massivov izobrazheniy [Construction of photographic maps of the underwater bottom based on large arrays of images] // Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Khabarovsk. 2014.
12. Samuel Samsudin. Introduction to Histogram Equalization for Digital Image Enhancement [Electronic resource]. URL: / <https://levelup.gitconnected.com/introduction-to-histogram-equalization-for-digital-image-enhancement-420696db9e43> (accessed 11/01/2022).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Павин Александр Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории систем управления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А. Ведущий научный сотрудник лаборатории машинной графики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИАПУ ДВО РАН), 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. e-mail: pavin@bk.ru

Alexander M. Pavin, Dr. Sci. (Eng), leading researcher of control systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A. Leading researcher of computer graphics laboratory, Institute of Automation and Control Processes Far East Branch of RAS (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Radio str., 5. e-mail: pavin@bk.ru

Ходоренко Максим Сергеевич, ведущий инженер лаборатории систем управления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН), 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А. e-mail: max@marine.febras.ru

Maxim S. Khodorenko, leading engineer of control systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of RAS (IMTP FEB RAS), 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A. e-mail: max@marine.febras.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.11.2023.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 629.123/004

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.020>

Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации и управления телеуправляемыми необитаемыми комплексами

Данцевич И.М.¹ dantsevich.aumsu@gmail.com, Лютикова М.Н.¹ mnlyutikova@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация: В работе рассматриваются системные подходы в создании телеуправляемых необитаемых комплексов на базе анализа и синтеза показателей технической производительности, удельной мощности, энерговооружённости и технической производительности по запасу плавучести. Достижимость желаемых характеристик сталкивается с обязательным требованием достижимостью статической устойчивости ТНПК. Указанные цели формируются на совокупности подцелей (целей второго ранга) и целей третьего ранга образующими дерево целей анализа и синтеза телеуправляемых необитаемых комплексов. Каждая из целей третьего ранга достижима при рассмотрении устойчивых решений соответствующих задач, описываемых строгим математическим аппаратом, в то же время условия задачи могут рассматриваться в выборе альтернатив начальных условий решаемых задач. Синтез параметров в области линеаризации характеристик позволяют реализовать различный тип программного управления ТНПК.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный комплекс (ТНПК), дерево целей, динамическая устойчивость, показатели энерговооружённости, удельной мощности, технической производительности, статическая устойчивость, повышение эффективности функционирования.

Для цитирования: Данцевич И.М., Лютикова М.Н. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации и управления телеуправляемыми необитаемыми комплексами. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 161—170. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.020

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.020>

Formalization and setting of system analysis, optimization and control of remote-controlled unmanned complexes

Igor M. Dantsevich¹ dantsevich.aumsu@gmail.com, Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The work considers system approaches in the creation of remote-controlled uninhabited complexes based on the analysis and synthesis of indicators of technical productivity, specific power, power-armament and technical productivity in terms of buoyancy reserve. The achievability of the desired characteristic faces the mandatory requirement of the achievability of the static stability of TNPK. Key targets are formed on a set of sub-targets (targets of the second rank) and targets of the third rank by calling the tree of targets for analysis and synthesis of remote-controlled uninhabited complexes. Each of the goals of the third rank is achievable when considering stable solutions to the corresponding problems described by a strict mathematical apparatus, while the conditions of the problem can be considered in choosing the alternative-natives of the initial conditions of the problems to be solved. Synthesis of parameters in the field of linearization of characteristics allows to implement different type of program control of TNPK.

Keywords: remote-controlled unmanned underwater complex (TNPK), target tree, dynamic stability, indicators of power, specific power, technical efficiency, static stability, increased efficiency of operation.

For citation: Igor M. Dantsevich, Marina N. Lyutikova. Formalization and setting of system analysis, optimization and control of remote-controlled unmanned complexes. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 161—170. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.020

Введение

Разработка и создание телеуправляемых необитаемых комплексов связана с обеспечением таких основных характеристик как прочность, плавучесть, снижение энергопотребления и техническая производительность, при условии удовлетворения критериям как статической, так и динамикой устойчивости. В то же время, учитывая, что статическая устойчивость ТНПК достигается прежде всего методами компоновки и выбора в

условиях альтернатив выбора гидромеханических параметров (совершенные или плохообтекаемые формы). Достижение возможной скоростной динамики ТНПК, или возможности быстрого переключения упоров при выполнении технологических программ задача декомпозиции, анализа и синтеза требует системного подхода в формировании системы требований достижимых характеристик [1-2].

При формулировке и анализе проблематики компоновки ТНПК ранее придерживались

параметров массы, потребляемой мощности, запаса плавучести, геометрические размеры. Однако для оценок взаимосвязи всех перечисленных выше характеристик в достижении оптимумов комбинации их показателей авторами [3] введены характеристики удельной мощности и энергоэффективности. Дальнейшее развитие указанного подхода определяет необходимость рассмотрения нормированных характеристик технической производительности, производительности по запасу плавучести и их производных.

Второй важный аспект при сохранении устойчивости (положения ТНПК в пространстве) – достижение наилучшей производительности использования рабочих инструментов при сохранении качества управления.

Достижимость указанных качеств ТНПК обеспечивается методологией системного анализа, формированием целей и подцелей в методике сравнимости парных альтернатив, а также оптимизацией влияющих параметров на достижение целей и подцелей численными методами и функциональной оптимизацией [3].

1. Дерево целей системного анализа влияющих факторов статической и динамической устойчивости ТНПК

Технический параметр энерговооружённости ТНПК по водоизмещению (дедвейту) [4]:

$$E_{DW} = \frac{N}{DW} \text{ [кВт/(тн.)]} \quad (1)$$

где N – мощность потребляемая энергосистемой ТНПК (кВт), DW – дедвейт (тн.). Учитывая, что входящие в формулу (1) показатели являются интегральными.

Параметр N – связан с КПД движительно-рулевого комплекса (ДРК), который в свою очередь обладает характеристиками упоров ДРК, например в продольно-поперечной плоскости силы P_x, P_y .

$$\begin{cases} P_x = (m_x + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt}, \\ P_z = (m_z + \lambda_{33}) \frac{dv_z}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где $m_x + \lambda_{11}$ – масса ТНПК с λ_{11} – значением присоединённых масс воды в проекции на движения в продольной плоскости x , $(m_z + \lambda_{33})$ – соответственно масса с присоединёнными массами воды в проекции на движения в поперечной плоскости z , v_x – составляющая скорости в продольном направлении и v_z – составляющая скорости в поперечном направлении.

На самом деле гидродинамические силы, действующие на ТНПК при его неустановившемся движении в любой из плоскостей, рассматривается как движение в идеальной безграничной жидкости и определяется через проекции векторов выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \bar{\omega} \times \bar{B}; \\ \bar{M} &= -\frac{\partial \bar{J}}{\partial t} - \bar{\omega} \times \bar{J} - \bar{u}_0 \times \bar{B}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{P}$ – вектор силы, приложенной в начале координат связанной с телом подвижной системы; $\bar{B}$ – главный вектор системы мгновенных импульсов давлений, действующих на поверхность тела; $\bar{\omega}$ – вектор мгновенной угловой скорости вращения тела

вокруг мгновенной оси, проходящей через начало подвижной системы координат; $\bar{M}$ – момент гидродинамических сил, действующих на тело, относительно начала координат подвижной системы; $\bar{J}$ – главный момент системы указанных импульсов относительно начала подвижной системы координат; $\bar{u}_0$ – вектор поступательной скорости начала подвижной системы координат.

Через проекции сил и моментов на связанные оси движения запишем:

$$\begin{aligned} P_x &= -\frac{\partial B_x}{\partial t} - \omega_y B_z + \omega_z B_y; \\ P_y &= -\frac{\partial B_y}{\partial t} - \omega_z B_x + \omega_x B_z; \\ P_z &= -\frac{\partial B_z}{\partial t} - \omega_x B_y + \omega_y B_x; \\ M_x &= -\frac{\partial J_x}{\partial t} - \omega_y J_z + \omega_z J_y - u_{0y} B_z + u_{0z} B_y; \\ M_y &= -\frac{\partial J_y}{\partial t} - \omega_z J_x + \omega_x J_z - u_{0z} B_x + u_{0x} B_z; \\ M_z &= -\frac{\partial J_z}{\partial t} - \omega_x J_y + \omega_y J_x - u_{0x} B_y + u_{0y} B_x; \end{aligned} \quad (4)$$

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – составляющие проекции угловых скоростей, u_{0x}, u_{0y}, u_{0z} – проекции скоростей, проекции векторов $\bar{B}$ и $\bar{J}$ определяются формулами (5):

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial T}{\partial u_{0x}} = \frac{\partial T}{\partial u_1}; B_y = \frac{\partial T}{\partial u_{0y}} = \frac{\partial T}{\partial u_2}; B_z = \frac{\partial T}{\partial u_{0z}} = \frac{\partial T}{\partial u_3}; \\ J_x &= \frac{\partial T}{\partial \omega_x} = \frac{\partial T}{\partial u_4}; J_y = \frac{\partial T}{\partial \omega_y} = \frac{\partial T}{\partial u_5}; J_z = \frac{\partial T}{\partial \omega_z} = \frac{\partial T}{\partial u_6}; \end{aligned} \quad (5)$$

где кинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^6 \lambda_{ik} u_i u_k. \quad (6)$$

Величины, входящие в (6)

$$\lambda_{ik} = -\rho \iint_S \varphi \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} \varphi_k ds \quad (7)$$

называются присоединёнными массами ТНПК. Поскольку u_i в (7) не входят, λ_{ik} не зависят от кинематики движения тела. Применяя к объёму V формулу Грина для функции φ_i, φ_k :

$$\iiint_V (\varphi_i \Delta \varphi_k - \varphi_k \Delta \varphi_i) dV = \iint_S (\varphi_i \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} - \varphi_k \frac{\partial \varphi_i}{\partial n}) dS - \iint_S (\varphi_i \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} - \varphi_k \frac{\partial \varphi_i}{\partial n}) dS. \quad (8)$$

Учитывая, что левая часть равенства равна нулю, поскольку $\Delta \varphi_i = \Delta \varphi_k = 0$, для бесконечного объёма жидкости, окружающей тело, справедливо условие

$$\iint_S \varphi_i \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS = \iint_S \varphi_k \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} dS, \quad (9)$$

т.е. $\lambda_{ik} = \lambda_{ki}$. Поэтому из 36 величин $\lambda_{ik} (i, k = 1, 2, \dots, 6)$ независимыми будут только 21. Следовательно, удвоенная величина кинетической энергии жидкости при движении в ней произвольного твёрдого тела записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} 2T &= \lambda_{21} u_1^2 + \lambda_{22} u_2^2 + \lambda_{33} u_3^2 + 2\lambda_{12} u_1 u_2 + \\ &+ 2\lambda_{13} u_1 u_3 + 2\lambda_{23} u_2 u_3 + 2u_1 (\lambda_{14} u_4 + \lambda_{15} u_5 + \lambda_{16} u_6) + \\ &+ 2u_2 (\lambda_{24} u_4 + \lambda_{25} u_5 + \lambda_{26} u_6) + 2u_3 (\lambda_{34} u_4 + \lambda_{35} u_5 + \\ &+ \lambda_{36} u_6) + \lambda_{44} u_4^2 + \lambda_{55} u_5^2 + \lambda_{55} u_6^2 + 2\lambda_{45} u_4 u_5 + \\ &+ 2\lambda_{46} u_4 u_6 + 2\lambda_{56} u_5 u_6. \end{aligned} \quad (10)$$

Присоединённые массы λ_{ik} , зависят от геометрической формы тела выбранной системы координат и от плотности жидкости ρ . Величины

$\lambda_{ik}(i, k = 1, 2, 3)$ имеют размерность массы, $\lambda_{ik}(i, k = 4, 5, 6)$ имеют размерность момента инерции.

Для ТНПК в случае движения в продольно-поперечной плоскости имеет всего две составляющие скорости: u_1 и u_2 . Тогда кинетическая энергия ТНПК определяется формулой $T_0 = m(u_1^2 + u_2^2)/2$, в то время как кинетическая энергия жидкости будет записываться в виде:

$$T = (\lambda_{11}u_1^2 + \lambda_{22}u_2^2 + 2\lambda_{12}u_1u_2)/2, \quad (11)$$

слагаемое $2\lambda_{12}u_1u_2$ определяют взаимное влияние двух течений жидкости, обусловленных скоростями тела u_1, u_2 .

Удельная мощность, показывает экономичность энергетической установки по потребляемой мощности, соответственно, чем она меньше, тем ТНПК более энергоэффективное:

$$N_{y\partial} = \frac{N}{DW \cdot v} [\text{кВт}/(\text{тн. уз})] \quad (12)$$

где N – мощность, потребляемая ДРК [кВт], DW – дедейт [тн.], v – скорость [уз].

Величина обратная удельной мощности является технической производительностью:

$$P_{mn} = \frac{DW \cdot v}{N} [(\text{тн. уз})/\text{кВт}] \quad (13)$$

Применимость ТНПК к поисково-спасательным работам, определяется параметром технической производительности по параметрам запаса плавучести (кгс), тогда

$$P_{3n} = \frac{Q \cdot v}{N} [(\text{тн. уз})/\text{кВт}] \quad (14)$$

где Q – запас плавучести ТНПК.

Технические характеристики связаны с выбором компоновки ТНПК, значениями присоединённых масс воды, определяющие кинематику комплекса, что в свою очередь определяются дизайном, соотношением плоскостей, обтекаемых (необтекаемых) форм, положением центра тяжести и другими влияющими факторами [5-7].

Параметр технической производительности связан с особенностями применения ТНПК:

- все ТНПК обычно работают в режимах малого хода, обусловленной ограниченной длиной кабеля, обеспечивающего питание телеуправляемого аппарата, как правило до 200 метров, и дистанцией визуального обзора с камер наблюдения ограниченной возможностью видения в воде в пределах 5-7 метров;

- ТНПК часто требует совершения быстрого манёвра для выполнения уклонения от столкновения с препятствиями, а также удержания рабочей позиции, а также необходимости широкого фокуса зрения с камер наблюдения в условиях отсутствия естественного освещения;

- ТНПК нуждается в динамической компенсации позиции, вызванной работой бортовых инструментов и применения манипуляторов, из-за нулевой плавучести комплекса и отсутствия противовесов комплексам рабочих инструментов.

Учитывая вышеуказанные факторы необходимо учесть крутизну рабочей характеристики ТНПК вызванной быстрым переключением мощности движителей на упор и изменение направления движения.

Введём параметр μ характеризующий «крутизну» характеристик упоров движителей:

$$\mu = \frac{v_i}{v_{max}} \quad (15)$$

где v_i – задаваемое текущее значение скорости ТНПК, v_{max} – максимально возможная скорость развиваемая ТНПА в маршевом, лаговом или вертикальном направлении.

Учитывая, что максимальное ускорение развиваемое ТНПК зависит от приложенной мощности к ДРК, но ограничено конструктивными особенностями, параметр μ при динамично изменяемой тяги будет сказываться на скорости движения ТНПК как:

$$\frac{dk_\mu(t)}{dt} = e^\mu, \text{ или } k_\mu(t) = \mu e^{\mu-1}. \quad (16)$$

Параметр технической производительности (13) оценивания качества управляемости ТНПК с учётом изменения параметров переключения упоров запишем в виде:

$$P_{mn} = \frac{DW \cdot v \cdot k_\mu}{N} [\text{тн. уз.}/\text{кВт}]. \quad (17)$$

Параметр k_μ – зависит больше не от мощности ДРК, но от скорости переключения движителей на максимальную мощность, т.е. от наклона и линейности механической характеристики движителей.

По показателям технических параметров можно сформировать дерево целей, показанных на рисунке 1.

Цели 1 ранга системного анализа по техническим показателям ТНПК вытекают из особенностей влияющих характеристик массы, мощности, скорости, которые в свою очередь связаны с параметрами гидродинамики, а также с параметрами присоединённых масс воды. Последние зависят от форм и размеров обтекаемых жидкостью профилей ТНПК. Последнее обстоятельство позволяет сформулировать задачу статической устойчивости – это сохранение положения ТНПК в рабочем состоянии на заданной глубине и полностью определяется размерами плоскостей, обтекаемых жидкостью.

Конструкция ТНПК предусматривает компоновку лёгкого и прочного корпусов в одной системе. Легкий корпус – это совокупность блоков плавучести, несущих конструкций силовой рамы на которой также размещаются система движительно-рулевого комплекса [8-9].

Выбор конфигурации системы блоков плавучести также связан с системой размещаемого движительно рулевого комплекса и также должен соответствовать требованиям статической устойчивости.

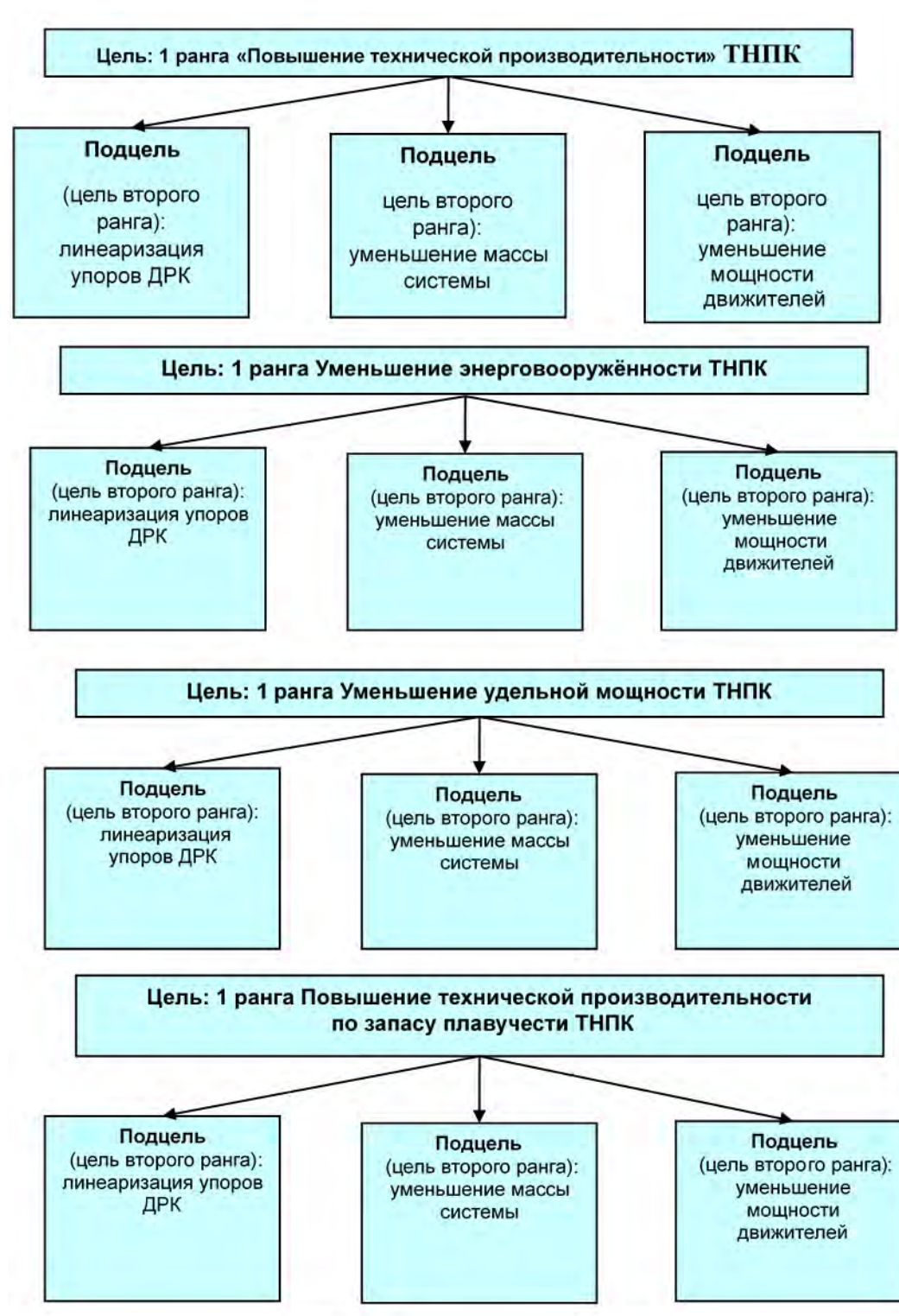


Рис. 1. Формирование целей системного анализа технических параметров ТНПК

Динамическая устойчивость зависит от способности ДРК компенсировать силовые воздействия на лёгкий корпус со стороны рабочих манипуляторов комплекса, а также изменения положения центра масс ТНПК в воде вне зависимости от возмущений среды вызванных изменением параметров солёности, температуры, подводных течений и других факторов.

Режимы работы упоров ДРК должны компенсировать изменение угла атаки, дифферента и крена, посредством возможности динамической компенсации скоростей в трёх плоскостях перемещений [10-11].

Анализ технических параметров показывает, что все они связаны с характеристиками качества управления – подцель линеаризации упоров ДРК, с

экономичностью – подцель уменьшение мощности движителей, с характеристиками манёвренности и запасами плавучести – уменьшение массы системы, рисунок 2.

Уменьшение массы ТНПК связано также с применением новых материалов и выбора компоновки профилей блоков плавучести из них.

Подцель (цель 2-го ранга) «Линеаризация упоров движителей ДРК» включает три составляющие 3-го ранга:

Рассмотренные цели допускают качественные и количественные оценки параметров путём достижимости параметров линейных преобразований ДРК, изменением времени выборки и коррекции коэффициентов передачи в непосредственно в канале управления и решающей обратной связи регуляторов. Уменьшение массы системы реализуется компоновкой лёгкого и прочного корпусов ТНПК. Уменьшение мощности движителей связана с уменьшением энергопотребления и оптимальной компоновкой

ТНПК, ДРК и анализом параметров гидродинамики комплекса в целом.

Уменьшение массы ТНПК связано также с применением новых материалов и выбора компоновки профилей блоков плавучести из них.

Подцель (цель 2-го ранга) «Линеаризация упоров движителей ДРК» включает три составляющие 3-го ранга:

1. Компенсация ошибок компоновки установки движителей.
2. Компенсация нелинейности механической характеристики.
3. Компенсация динамики джойстиков управления и датчиков динамики.

Подцель (цель второго ранга) «Уменьшение массы» содержит две составляющие третьего ранга:

1. Выбор обтекаемых плоскостей, формирующих статическую устойчивость.
2. Учёт присоединённых масс поверхностей прочного корпуса.

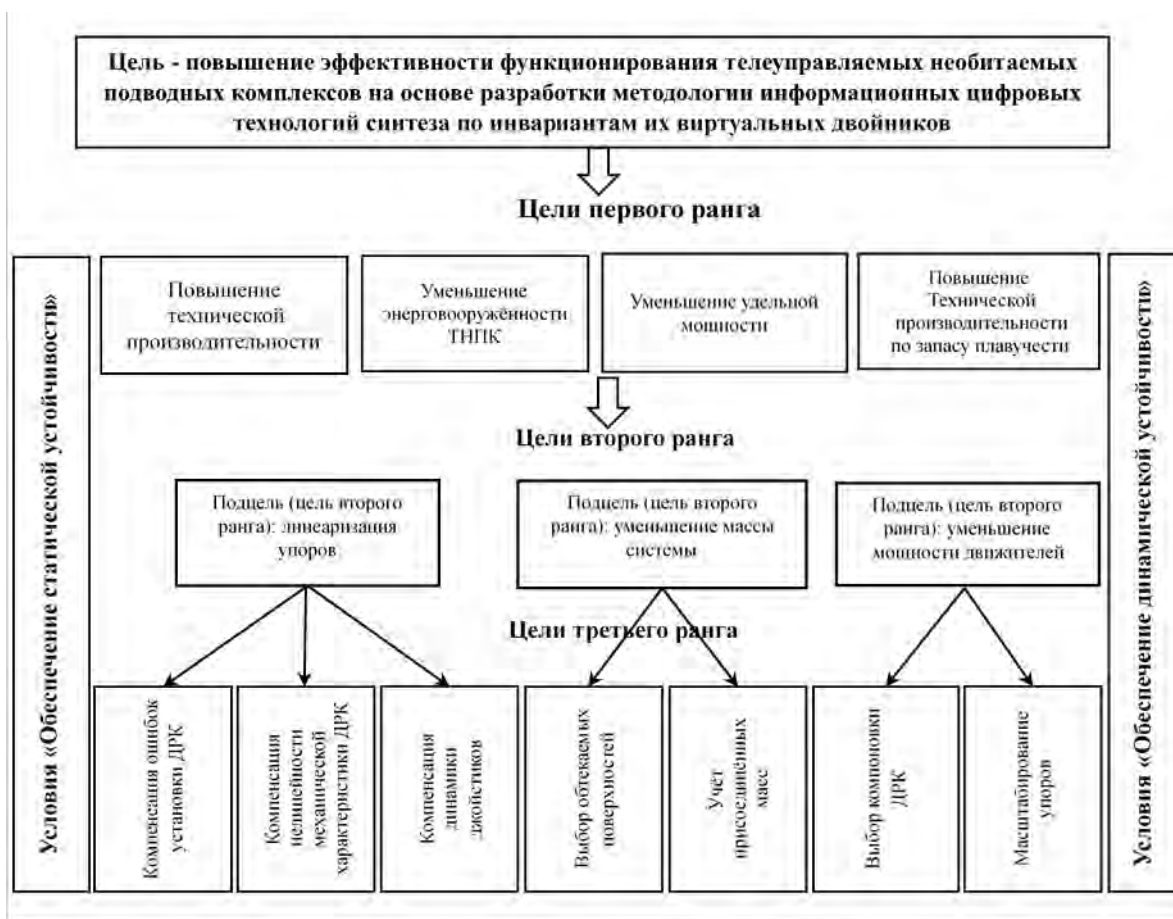


Рис.2. Формирование иерархии целей с условиями системного анализа декомпозиции, анализа и синтеза ТНПК

Подцель (цель второго ранга) «Уменьшение мощности движителей» содержит две составляющие третьего ранга:

1. Выбор компоновки ДРК.
2. Возможность масштабирования упоров (задаваемой динамики).

Представленные цели первого ранга достигаются подцелями (целями 2 ранга), допускающими функциональную оптимизацию численными

методами компенсации ошибок установки ДРК, нелинейности механических характеристик.

Выбор компоновки в области гидродинамики строится на теории и практике бассейновых и аэротрубных экспериментов, реализованных в численных (иногда эмпирических) методиках расчёта по выбираемым профилям дизайна ТНПК.

Цели третьего ранга достигаются решением нескольких частных задач:

– первая частная задача – определение гидродинамических параметров ТНПК достигается комплексом оптимизационных методик синтеза поверхностей и объёмов блоков плавучести и лёгкого корпуса ТНПК, многоэлементное моделирование динамики ТНПК, экспериментальные исследования конструкции в бассейне и аэродинамической трубе;

– вторая частная задача – численные методы обработки информации, управления и моделирования, методология преобразования Меллина к системе управления ТНПК (изменение параметров интегрирования входных данных измерения динамики и преобразования выходных управляющих сигналов);

– третья частная задача – линейаризация тяговых характеристики ТНПК, компенсация ошибок установки движителей, компенсация динамики дрейфов;

– четвёртая частная задача – анализ и синтез масштабируемых систем управления ДРК с учётом решающих обратных связей и изменением гидродинамических параметров ТНПК при возможных вариантах динамики;

– пятая частная задача – систематизация численных методов при создании цифрового двойника ТНПК включая системы управления и виртуальных экспериментах, формирование множеств сигналов управления ТНПК численными методами;

– шестая частная задача – синтез интегрированной системы управления, включая систему управления движителями ТНПК с дискретным ПИД регулятором, а также разработка системы управления ТНПК по инвариантам вычислительных моделей виртуальных двойников на графических процессорах.

2. Синтез программных операторов движения ТНПК

Решение комплекса частных задач возможно путём многоэлементного моделирования с компенсацией ошибок и корректировкой рассчитываемых на каждом шаге решения задачи характеристик ДРК, включая синтез программных операторов движения ТНПК [12].

Невозможно решение задачи линейаризации системы упоров движителей по выбранным вариантам управления без выбора и синтеза профилей и поверхностей блока плавучести, включая компоновки легкого и прочного корпусов по методологии (3-11).

Вопросы отработки динамики ТНПК и синтеза ПИД регуляторов предусматривают введение в цепь обратной связи решающих операторов позволяющие вычислять позицию ТНПК, а также его скоростную динамику.

Динамика ТНПК в продольно-поперечной плоскости обеспечивается набором параметров перекрёстного управления: $F(P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z)^T$, где $P_{x,y,z} = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_{Y1}, P_{Y2}, P_{Y3})^T$ – силы упоров маршевых двигателей ТНПК [9; 13].

Обычно $\forall P_{ij}, \exists b_{ij}, b = \{1, \bar{\tau}, 2, 3, 4\}$, учитывая нелинейную систему запишем в виде полинома

$$\sum_{i+j+k=0}^n a_{ij}(t) C_{x,i}^i C_{y,j}^j C_{z,k}^k + F(x(t), y(t), z(t)) = \sum_{i+j=0}^m b_{ij}(t) C_{x,i}^i C_{y,j}^j C_{z,k}^k, \quad (18)$$

где $C_{x,i}^i, C_{y,j}^j, C_{z,k}^k$ – коэффициенты сопротивления движению ТНПК в зависимости от угла атаки α и скольжения β , в общем случае:

$$f(\alpha, \beta) = \sum_{i+j=0}^n a_{i,j} C_{x,i}^i C_{y,j}^j C_{z,k}^k. \quad (19)$$

Линеаризация уравнения (19) выполняется интегрированием ряда по малому значению τ параметра значение которого изменяется выбором масштаба задаваемых значений с органов управления ТНПК [8-9]:

$$k_{x,y,z}(t, \tau) = 1(t - \tau) \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m}{(n!)^m} \frac{d^m}{d\tau^m} [a_m(\tau)(t - \tau)^n],$$

$$k_f(t, \tau) = 1(t - \tau) \frac{1}{n!} (t - \tau)^n, \quad (20)$$

вида

$$\int_0^T k_{x,y,z}(t, \tau) x(\tau) y(\tau) z(\tau) d\tau + \int_0^T k_f(t, \tau) F(x(t), y(t), z(t)) d\tau = 0. \quad (21)$$

Вектор пространства состояний ТНПК $\{\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}\}$, представим заданным по ортонормированному базису:

$$\bar{S}(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) = \{s_i(t); i = \overline{1, \infty}, t \in [0, T]\}, \quad (22)$$

$$S = F^T(t) C_{x,y,z},$$

$$F(x(t), y(t), z(t)) = F^T(t) C_{x,y,z}^f,$$

$$k_{x,y,z}(t, \tau) = F^T(t) A_{x,y,z} F(\tau),$$

$$k_f(t, \tau) = F^T(t) A^f F(\tau). \quad (23)$$

Матрица возмущений формируется по идентификации $F(t) = [s_1(t) s_2(t) \dots s_N(t)]^T$ с коэффициентами

$$C_{x,y,z} = \begin{bmatrix} c_{x,x} & c_{x,y} & c_{x,z} \\ c_{y,x} & c_{y,y} & c_{y,z} \\ c_{z,x} & c_{z,y} & c_{z,z} \end{bmatrix},$$

$$c_{x,i} = \int_0^T x(t) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$c_{y,i} = \int_0^T y(t) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$c_{z,i} = \int_0^T z(t) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$c_{x,y,z}^f = \int_0^T F(x(t), y(t), z(t)) s_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (24)$$

Набор коэффициентов состояний системы определяем матрицей A

$$\begin{cases} A_{x,y,z} = \left\{ \int_0^T \int_0^t k_{x,y,z}(t, \tau) s_{i,j}(t, \tau) dt d\tau \right\}_{i,j=1}^N \\ A^f = \left\{ \int_0^T \int_0^t k_f(t, \tau) s_{i,j}(t, \tau) dt d\tau \right\}_{i,j=1}^N \\ A^e = \{a_{i,j}\}_{i,j=1}^N \end{cases} \quad (25)$$

Уравнение (18) в матричной форме

$$[A][C] + [A^f][C^f] = [F]. \quad (26)$$

Спектр матрицы коэффициентов малых приращений

$$[C^f] = [A^e][C]. \quad (27)$$

Линеаризацию уравнения (19) выполним из предположения программного движения по малым приращениям координат

$$\begin{cases} X(\alpha, \beta) \cong X_0 + X^\alpha \Delta\alpha + X^\beta \Delta\beta + \chi(\alpha, \beta) \\ Y(\alpha) \cong Y_0 + Y^\alpha \Delta\alpha + \chi(\alpha) \\ Z(\beta) \cong Z_0 + Z^\beta \Delta\beta + \chi(\beta) \\ M_x(\beta, \omega_x) \cong M_{x0} + M_{x0}^\beta \Delta\beta + M_{x0}^{\omega_x} \Delta\omega_x + \chi(\beta, \omega_x) \\ M_y(\beta, \omega_y) \cong M_{y0} + M_{y0}^\beta \Delta\beta + M_{y0}^{\omega_y} \Delta\omega_y + \chi(\beta, \omega_y) \\ M_z(\alpha, \omega_z) \cong M_{z0} + M_{z0}^\alpha \Delta\alpha + M_{z0}^{\omega_z} \Delta\omega_z + \chi(\alpha, \omega_z). \end{cases} \quad (28)$$

В соответствие с (26) вычисление коэффициентов (28) производится:

- разложением исходного сигнала управления от манипуляторов пилота или автопилота ТНПК $S = \{V_x, V_y, V_z\}$ в полифазном фильтре на систему сигналов с разной частотой дискретизации;
- вычисления среднеквадратического значения по декомпозициям по правилу $0,707 \leq f^2 \leq 1$;
- трешолдинга по выбранным коэффициентам разложения сигнала в полифазном фильтре A^f ;
- восстановление S^X на каждом шаге по функции времени t .

Синтезируемая система управления предназначена также для передачи сигналов управления по кабелю,

или другому телеметрическому каналу. Тогда для уменьшения объема передаваемых данных можно применить процедуру децимации сигнала по уровням декомпозиции, не удовлетворяющих правилу $0,707 \leq f^2 \leq 1$.

По изменению порядка фильтров (за счёт интерполяции (децимации)) аналогично происходит изменение порядка упоров (масштабирования) ДРК по определённым типовым видам динамики. Всего определены восемь «чистых» вариантов перемещения ТНПК: «вперёд-назад», «влево-вправо», «налево-направо», «сдвиг влево-вправо».

Результаты

Использованный подход применим для синтеза семейства телеуправляемых необитаемых аппаратов следующего поколения по системному анализу достижимых технических параметров (12-17).

Исходными данными примем технические данные зарубежного аналога ТНПК «Comanche» (Великобритания), отечественный ТНПК РТК 6000 (рисунок 3) и вновь созданный в рамках государственного НИОКР ТНПК 6000 (рисунок 4).

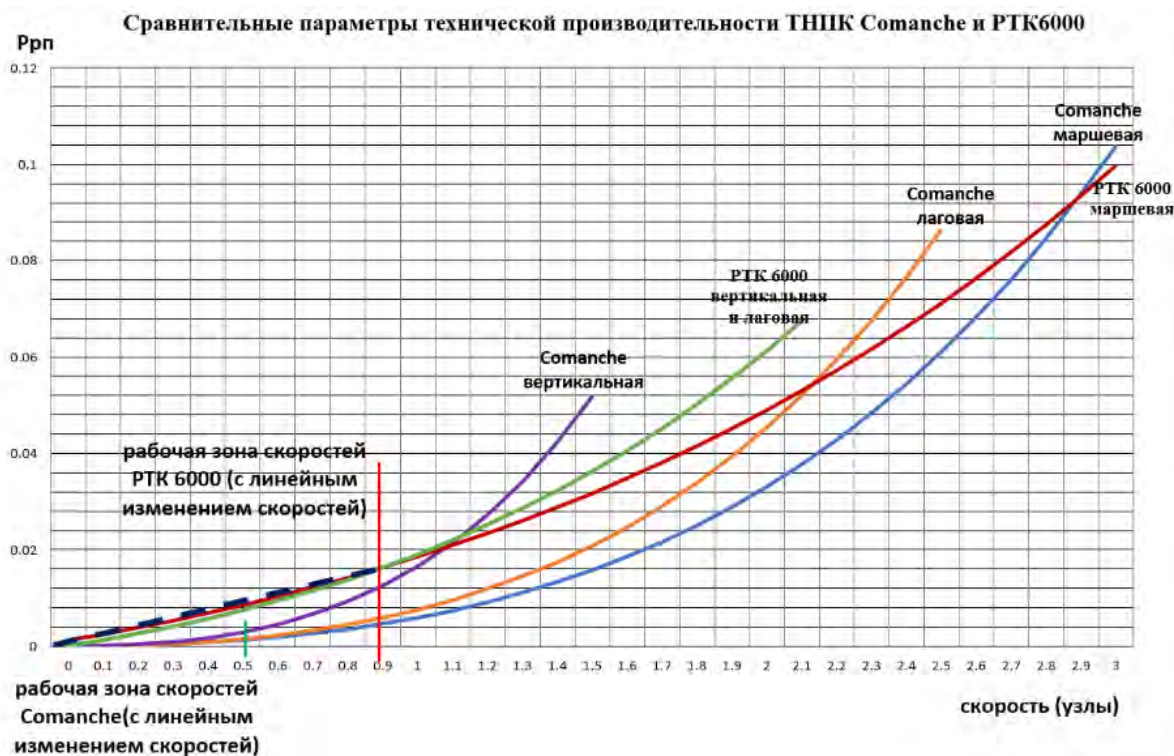


Рис. 3. Сравнительный анализ технических характеристик ТНПК рабочего класса Comanche (Великобритания) и РТК 6000 (Россия)

Энерговооруженность ТНПК «Comanche» ниже ТНПК «РТК 6000» практически в 1,5 раза, с этой точки подцель 1 ранга, требует выполнения подцелей строго и третьего ранга линеаризации характеристик ДРК, уменьшения массы ТНПК прямо сказывающейся на другой связанной цели первого ранга достижимость хорошей технической производительности.

Исходя из противоречивости требований в ТНПК «РТК 6000» лучшие показатели технической

производительности, как следует из рисунка 3, были достигнуты ухудшением показателей двух других целей первого ранга – уменьшение энерговооруженности и повышение технической производительности по запасу плавучести.

Во вновь созданном ТНПК 6000 удалось уменьшить энерговооруженность ТНПК, повысить техническую производительность по запасу плавучести, а также уменьшить удельную мощность.



Рис. 4. Сравнительный анализ технических характеристик ТНПК рабочего класса Comanche (Великобритания) и ТНПК 6000 (Россия)

Улучшение технических параметров удалось добиться удачной компоновкой ТНПК 6000, при тех же значениях мощности ДРК, удалось, применяя подходы выбора плохообтекаемых профилей, подбора элементов лёгкого и прочного корпуса, исходя из соображений достижимости статической устойчивости (3-11).

Выводы

Удалось достичь линеаризации упоров ДРК в рабочей зоне скоростей практически до значения 1.1 узла. Этот показатель практически важен при выполнении программы удержания позиции ТНПК при выполнении различных подводно-технических работ. ТНПК имеет практически нулевую плавучесть,

работа манипуляторов ТНПК оказывается некомпенсированной массой рабочей платформы, по этим причинам возможность быстрого переключения ДРК при выполнении работ имеет приоритетное значение (18-28).

Как видно из рисунков 3 и 4 зона линейного изменения силовых показателей упоров ДРК относится к запасу по параметру технической производительности, поэтому при отработке соответствующих элементов движителей работающих на глубине 6000 метров у создателей комплексов остаётся запас по параметрам на возможность применения ДРК с более низкими энергетическими показателями.

Литература

1. Вельтищев В. В. Организация технических средств подготовки операторов подводных аппаратов. Инженерный журнал: наука и инновации. №. 11 (11), 2012, С. 29.
2. Шахтарин Б.И., Вельтищев В.В. Имитационные комплексы для подготовки операторов подводных аппаратов. Научный вестник Московского Государственного Технического Университета Гражданской Авиации. № 210(1). 2014.
3. Маслова О. И., Шагрова Г. В. Моделирование и разработка системы внедрения и распознавания скрытых изображений. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Т. 8. №. 2., 2020, С. 22-23.
4. Рулевский В. М. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с компенсацией реактивной мощности. Морские интеллектуальные технологии. №. 2-1. 2014, С. 17-21.
5. Матвиенко Ю. В. и др. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе. Подводные исследования и робототехника. №. 1. 2015, С. 4-15.
6. Рулевский, В. М. Техническая реализация и алгоритмическое обеспечение системы электропитания удалённого потребителя электроэнергии. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 22(2), 2019, 128-134.
7. Гайкович, А. И., Никитин, Н. В., Суслов, А. Н., & Хань. Аналитический метод определения мощности энергетической установки катамарана. Морские интеллектуальные технологии, 2019, С. 80

8. Лютикова М. Н. Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 153-159.
9. Лютикова М.Н., Бузенков И.И., Халеева Е.П., Малахов С.О., Цепордей О.В. Совмещение систем позиционирования универсальных многоцелевых буксируемых геофизических комплексов с системами судна-носителя, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 191-199.
10. Лубенцова Е. В., Лубенцов В. Ф. Многокритериальный выбор алгоритмов систем управления. Наука. Инновации. Технологии. № 1, 2014, С. 97-110.
11. Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 242—250.
12. Епихин, А. И., Хекерт, Е. В., & Модина, М. А. Принципы нейроуправления и варианты архитектуры нейронных сетей, применительно к сложной динамической системе СЭУ-СУДНО. Морские интеллектуальные технологии, 4(4), 2020, 18-22.
13. Лютикова М. Н. Мультиагентная сеть управления группой автономных морских подвижных объектов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1 (60), С. 144-154.

References

1. Veltishchev V.V. Organization of technical means for training underwater vehicle operators. International Journal: Science and Innovation. №. 11 (11), 2012, P. 29.
2. Shakhtarin B.I., Veltishchev V.V. Simulation complexes for the training of underwater apparatus operators. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. № 210(1). 2014.
3. Maslova O. I., Shagrova G.V. Modeling and development of a system for introducing and recognizing hidden images. Modeling, optimization and information technology. Т. 8. №. 2., 2020, PP. 22-23.
4. Rulevsky V. M. Power supply system of a remote-controlled uninhabited underwater complex with reactive power compensation. Marine intelligent technologies. No. 2-1. 2014, pp. 17-21.
5. Matvienko Yu. V. A complex of robotic tools for performing search operations and monitoring the underwater infrastructure on the shelf. Underwater research and Robotics. No. 1. 2015, pp. 4-15.
6. Rulevsky, V. M. Technical implementation and algorithmic support of the power supply system of a remote consumer of electricity. Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 22(2), 2019, 128-134.
7. Gaikovich, A.I., Nikitin, N.V., Suslov, A.N., & Han. Analytical method for determining the power of an ener-ge-th installation of a catamaran. Marine Intelligent Technologies, 2019, p. 80
8. Lyutikova M. N. Improving the management of a multi-purpose towed complex with the use of a neural network controller in the asymptotics of Bernstein polynomials, Marine intelligent technologies. 2022. No. 3 part 1, pp. 153-159.
9. Lyutikova M.N., Buzenkov I.I., Khaleeva E.P., Malakhov S.O., Tsepordey O.V. Combination of positioning systems of universal multipurpose towed geophysical complexes with carrier systems, Marine intelligent technologies. 2023. No. 1 part 1, pp. 191-199.
10. Lubentsova E. V., Lubentsov V. F. Multi-criteria selection of control system algorithms //The science. Innovation. Technologies. No. 1, 2014, pp. 97-110.
11. Dantsevich I.M., Lubentsov V.F. Determination of parameters of hydrodynamic coefficients in operating control functions of remote-controlled uninhabited vehicles, Marine intelligent technologies. 2022. No. 4 part 1, pp. 242-250.
12. Epikhin, A.I., Khekert, E.V., & Modina, M.A. Principles of neuro-control and variants of neuron-network architecture applied to complex SEU-VESSEL dynamic system. Marine Intelligent Technologies, 4 (4), 2020, 18-22.
13. Lyutikova M.N. Multi-agent management network of a group of autonomous marine mobile facilities, MOR intelligent technologies. NO. 2-1 (60), 2023, S. 144-154.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Данцевич Игорь Михайлович кандидат технических наук, исполнительный директор НИИ: ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93.

Igor M. Dantsevich Ph.D. (Eng), Executive Director of Research Institute: Admiral Ushakov maritime state university, 353924, Russia, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: dantsevich.aumsu@gmail.com

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D., Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.09.2023.

Научная статья

УДК 519.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021>

Модели и алгоритмы централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов на основе теории дифференциальных игр

Захаров В.В.¹ valeriov@yandex.ru, Баранов А.Ю.¹ yuiomer1337@gmail.com,Соколов Б.В.¹ sokolov_boris@inbox.ru, Юсупов Р.М.¹ yusupov@iiias.spb.su¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Аннотация. Актуальность и цели. Одной из важнейших и актуальных задач, обеспечивающих эффективное функционирование группировки (Гр) подвижных объектов (ПдО) является задача комплексного планирования (КП) их применения. Цель статьи состоит в обобщенном описании специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО) решения задачи КП применения Гр ПдО. Материалы и методы. Главные проблемы и трудности задачи КП состоят в распределенности, нестационарности и нелинейности процессов, которые требуется описывать при ее постановке и решении. Традиционно формальное описание и решение исследуемой задачи проводится на основе многочисленных упрощений и эвристик. Один из эффективных способов преодоления перечисленных трудностей, которые базируются на научных результатах, полученных в теории дифференциальных игр. В статье предложено обобщенное описание оригинальных логико-динамических моделей (ЛДМ) планирования применения Гр ПдО для случаев централизованного и децентрализованного планирования. Результаты. Предложена динамическая интерпретация исследуемой задачи КП, которая позволила указанный процесс описать как процесс программного управления соответствующей ЛДМ. В этом случае удается полученные ранее в теории дифференциальных игр научные результаты на конструктивном уровне использовать при централизованном и децентрализованном КП применения Гр ПдО. Выводы. Разработаны обобщенные модели и алгоритмы программного управления процессами взаимодействия ПдО на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина. Предложенное СМАО позволяет синтезировать эталонные (оптимальные) решения в задачах децентрализованного планирования применения Гр ПдО, для которых ранее в большинстве случаев предлагаются эвристические решения без оценки их погрешности. К настоящему времени полученные результаты успешно реализованы в аэрокосмической, транспортно-логистической и судостроительной сферах.

Ключевые слова: централизованное планирование, децентрализованное планирование, комплексное планирование, планирование применения подвижных объектов

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>

Для цитирования: Захаров В.В., Баранов А.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модели и алгоритмы централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов на основе теории дифференциальных игр. 2023. № 4 часть 1, С. 171—178. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.021

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021>

Models and algorithms for centralized and decentralized scheduling of the application of grouping moving objects based on the theory of differential games

Valerii V. Zakharov¹ valeriov@yandex.ru, Anton Yu. Baranov¹ yuiomer1337@gmail.com,Boris V. Sokolov¹ sokolov_boris@inbox.ru, Rafael M. Yusupov¹ yusupov@iiias.spb.su¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Relevance and goals. One of the most important and urgent tasks that ensure the effective functioning of the grouping (Gr) of mobile objects (PO) is the task of integrated scheduling (IS) of their use. The purpose of the article is to provide a generalized description of the special model-algorithmic support (SMAS) for solving the IS problem of applying Gr PdO. Materials and methods. The main problems and difficulties of the IS task lie in the distribution, non-stationarity and nonlinearity of the processes that need to be described when setting and solving it, as well as the need to take into account possible environmental disturbances on the implementation of the synthesized schedule, as well as the multi-criteria nature of its choice. Traditionally, a formal description and solution of the problem under study is carried out on the basis of numerous simplifications and heuristics. One of the effective ways to overcome the above difficulties in setting and solving distributed scheduling problems of this kind is based on models, methods and algorithms for dynamic decomposition and coordination of scheduling problems, which are based on scientific results obtained in the theory of differential games. The article proposes a generalized description of the original logical-dynamic models (LDM) for scheduling the use of Gr MO for cases of centralized and decentralized scheduling. Results. A dynamic interpretation of the studied IS problem is proposed, which allows describing the specified process as a process of program control of the corresponding LDM. In this case, it is possible to use the scientific results obtained earlier in the theory of differential games at a constructive level for centralized and decentralized IS applications of MO Gr. Conclusions. Generalized models and algorithms for program control of MO interaction processes based on the

maximum principle of L.S. Pontryagin. The proposed SMAS makes it possible to synthesize reference (optimal) solutions in the problems of decentralized scheduling for the use of MO Gr, for which heuristic solutions are previously proposed in most cases without estimating their error. To date, the results obtained have been successfully implemented in the aerospace industry.

Keywords: centralized planning, decentralized planning, integrated planning, mobile object application planning

Financial Support: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>

For citation: Valerii V. Zakharov, Anton Yu. Baranov, Boris V. Sokolov, Rafael M. Yusupov, Models and algorithms for centralized and decentralized scheduling of the application of grouping moving objects based on the theory of differential games. 2023. № 4 part 1, P. 171—178. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.021

Введение

В настоящее время широкое применение на практике получили различные виды и классы подвижных объектов (ПДО), в качестве которых могут рассматриваться, например, космические аппараты, летательные аппараты, в том числе и беспилотные, наземные, морские (как надводные, так и подводные) робототехнические комплексы. Для выполнения поставленных целевых задач они могут объединяться в группировки (Гр), так как информационно-технологические возможности каждого отдельного ПДО весьма ограничены. Анализ показывает, что структура и параметры такой группировки изменяются как из-за движения каждого ПДО, так и из-за необходимости выполнения определенных пространственно-временных, технических и технологических ограничений, а также воздействия ряда внутренних и внешних возмущающих факторов.

Наблюдаемая структурная динамика группировки ПДО придает особую актуальность постановки и решения не только задач планирования и управления перемещением ПДО, но и задач управления ИнП, включающими в себя процессы сбора, хранения, обработки и передачи информации как о состоянии самой Гр, образованной данными объектами, так и состояния целевых объектов, наблюдение за которыми осуществляет данная группировка. При этом, возрастает важность решения двух взаимосвязанных подклассов задач управления ИнП. Это, во-первых, задача синтеза наилучшей технологии организации информационных процессов для рассматриваемой группировки при условии, что известна ее структурная динамика (решены задачи согласованного (кооперативного) движения подвижных объектов). Во-вторых, задача программного управления (планирования) информационными процессами для синтезированной технологии управления указанными процессами. Данные задачи мы в статье объединим под общим названием задача комплексного планирования применения Гр ПДО (для используемых в статье логико-динамических моделей (ЛДМ) данная задача будет рассматриваться как задача программного управления применением Гр ПДО) [1-5]. Главные особенности рассматриваемой задачи планирования состоят в ее большой размерности, нестационарности, нелинейности. Кроме того, при решении данной задачи необходимо учитывать возможные возмущения внешней среды на реализацию синтезированного плана, а также многокритериальный характер его выбора. В настоящее время в данное время широкое распространение получили модели, методы и

алгоритмы, базирующиеся на научных и практических результатах, полученных в одном из перспективных направлений современной информатики, а именно в искусственном интеллекте (мультиагентные системы, технологии вычислительного и гибридного интеллекта и т.п.). Также при решении частных вариантов рассматриваемой задачи управления структурной динамики Гр ПДО получили следующие модели: сети Петри, модели, используемые в математическом программировании, модели Марковских и полумарковских цепей, модели, базирующиеся на байесовском и нечетко-возможностном подходах [3,6,8-10]. Однако при применении данных подходов, основанных, в большинстве случаев, на различных эвристиках, очень важно иметь соответствующие эталонные (оптимальные) решения, получение которых проблематично в рамках перечисленных теорий. Данные эталонные решения позволяют оценивать погрешности соответствующих эвристик. Один из эффективных способов преодоления перечисленных трудностей при постановке и решения задач планирования базируется на моделях, методах и алгоритмах динамической декомпозиции и координации задач планирования, которые разрабатываются в теории дифференциальных игр. Полученные в рамках рассматриваемой статьи результаты, как показывает предварительный анализ могут рассматриваться в качестве таких эталонных решений [1,2,5].

Рассмотрим возможные пути использования фундаментальных и прикладных научных результатов данной теории применительно к постановке и решению задач централизованного и децентрализованного комплексного планирования применения Гр ПДО.

Содержательное и формальное описание задач централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов

Следуя работам [1,3,4,5,7,8], содержательную и формальную постановку задач централизованного и децентрализованного планирования функционирования Гр ПДО можно описать следующим образом

Дано:

1) Горизонт планирования $[T_0, T_k]$, где T_0 и T_k – (календарное) время начала и окончания исполнения группового сценария поведения, причём значение T_k может задавать самое позднее допустимое время окончания выполнения сценария групповой работы ПДО или в постановке задачи оно может быть не задано.

2) Сценарий действий группы ПДО, т.е. частично-упорядоченное множество действий X , которое

должно быть выполнено на заданном временном горизонте для достижения поставленной цели (в логико-динамических моделях (ЛДМ), предложенных в [1,2,5] возможные сценарии поведения группы ПдО, задаются с помощью соответствующих динамических смешанных ограничений).

3) Множество ПдО, каждому из которых поставлен в соответствие список элементарных действий сценария (элементарные (неделимые) операции), которые он способен выполнять и интервалы времени доступности объекта.

4) Множество специфических предметно ориентированных ограничений на использование ПдО на множестве действий сценария (например, по техническому состоянию, по прогнозируемым погодным условиям и т.п.).

5) Обобщенный показатель качества решения задачи планирования (коррекции плана, перепланирования) $F(P(X, D([T_0, T_k])))$, где $P(X, D([T_0, T_k]))$ – скоординированное в пространстве и во времени распределение множества ПдО $D([T_0, T_k]) = \{D_j([T_0, T_k])\}_{j=1}^M$ на горизонте планирования $[T_0, T_k]$ по множеству действий $X = \{X_i\}_{i=1}^N$ сценария.

В результате решения задачи предполагается получить план распределения $P(X, D([T_0, T_k]))$ Гр ПдО в пространстве и во времени на множестве возможных реализаций сценариев взаимодействия рассматриваемой группировки, с учётом всех наложенных динамических ограничений, которое оптимизирует показатель качества управления F .

В отличие от работ [3,6], где в качестве формального аппарата описания и решения перечисленных выше задач предлагалось использовать атрибутивную формальную грамматику либо модели и алгоритмы, в основе которых лежит поиск на графах типа «и – или», в рамках данной статье мы будем использовать методологию и технологии комплексного моделирования процессов проактивного (упреждающего) управления и координации поведения самоорганизующейся группы ПдО. В рамках указанной методологии в качестве базовых моделей будут использоваться логико-динамические модели (ЛДМ), описанные ранее в многочисленных публикациях авторов данной статьи [1-2,7-8]. Применительно к вопросам планирования ИнП при взаимодействии ПдО пример таких моделей приведен в недавно опубликованной статье [5].

Обобщённое полимодельное описание процесса программного управления Гр ПдО или, по-другому, планирования функционирования Гр ПдО представляет собой детерминированную высокразмерную билинейную нестационарную конечномерную дифференциальную логико-динамическую систему, которую можно представить в следующем виде:

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \dot{\vec{x}}(t) = \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}, t); \\ \vec{h}_0(\vec{x}(t_0)) \leq \vec{0}; \vec{h}_1(\vec{x}(t_f)) \leq \vec{0}; \\ \vec{q}^{(1)}(\vec{x}, \vec{u}) = \vec{0}; \vec{q}^{(2)}(\vec{x}, \vec{u}) \leq \vec{0} \end{array} \right\} \quad (1)$$

где $\vec{x} = \|\vec{x}^{(o)T} \vec{x}^{(k)T} \vec{x}^{(n)T} \vec{x}^{(c)T}\|^T$; $\vec{u} = \|\vec{u}^{(o)T} \vec{u}^{(k)T} \vec{u}^{(n)T} \vec{u}^{(c)T}\|^T$ – обобщённые векторы состояния и управления Гр ПдО; верхние индексы

“о”, “к”, “п”, “с” – соответствуют компонентам векторов состояния и управления Гр ПдО, которые используются в частных ЛДМ программного управления операциями, ресурсами, потоками и структурами, входящих в состав обобщенной ЛДМ (см. далее рис.1); $\vec{h}_0, \vec{h}_1$ – известные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия; $\vec{q}^{(1)}, \vec{q}^{(2)}$ – векторные функции, с помощью которых задают основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования Гр ПдО. Кроме выражения (1) в состав детерминированной ЛДМ планирования входит система показателей качества планирования (программного управления), задаваемая, например, следующим обобщённым векторным показателем качества:

$$\vec{J}_{06} = \|\vec{J}^{(o)T} \vec{J}^{(k)T} \vec{J}^{(n)T}\|^T \quad (2)$$

Компоненты обобщённых векторов состояния, управления и показателей качества относятся к следующим моделям (рис. 1): $\vec{x}^{(o)T}, \vec{u}^{(o)T}$ и $\vec{J}^{(o)T}$ – модель управления операциями M_o ; $\vec{x}^{(k)T}, \vec{u}^{(k)T}$ и $\vec{J}^{(k)T}$ – модель управления ресурсами M_k ; $\vec{x}^{(n)T}, \vec{u}^{(n)T}$ и $\vec{J}^{(n)T}$ – модель управления потоками M_n ; $\vec{x}^{(c)T}$ и $\vec{u}^{(c)T}$ – модель управления структурами M_c .

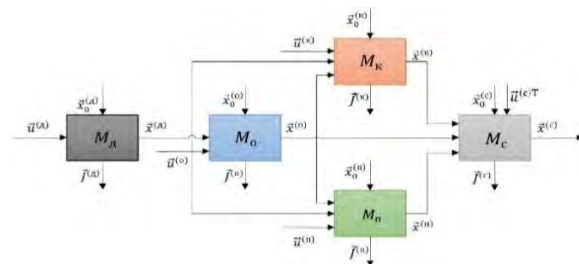


Рис. 1. Состав обобщённой динамической модели централизованного и децентрализованного планирования Гр ПдО

На рис. 1 представлены взаимосвязи рассмотренных выше моделей. Так на модель управления операциями M_o оказывает воздействие состояние $\vec{x}^{(d)T}$ модели движения M_d посредством матричной временной функции Θ_{ikj} . Подробно с данной моделью и всеми другими моделями программного управления ПдО можно ознакомиться, изучив работы [1,2,7]. В свою очередь, модель управления операциями M_o посредством управления $\vec{u}^{(o)T}$ влияет на модель управления ресурсами M_k , так как от $\vec{u}^{(o)T}$ зависит её состояние $\vec{x}^{(k)T}$, а также на модель управления потоками M_n , через её ограничения. Модель программного управления структурами взаимосвязана с моделью управления основными операциями M_o и моделью управления потоками M_n через переменные состояния $\vec{x}^{(o)T}$ и $\vec{x}^{(n)T}$ соответственно. Одно из основных достоинств разработанных комбинированных моделей состоит в том, что они обеспечивают на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректное согласование (в соответствии с критериями гомоморфизма (динамоморфизма) отношений) математических (аналитико-имитационных) моделей

проактивного управления структурной динамикой сложных динамических объектов (в нашем случае Гр. ПДО) с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационных технологий. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей ПДО, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволяет на конструктивном уровне решать задачи многокритериального оперативного структурно-функционального синтеза как облика ПДО и Гр, так и соответствующих информационных технологий (ИТ) мониторинга, прогнозирования и управления, а также синтеза сценариев их поведения [1-2]. При этом проактивность синтезированных программ управления обеспечивается за счет многовариантного ситуационного выбора тех планов (программ управления), которые обладают требуемым уровнем структурно-функциональной избыточности, необходимой для гарантированного парирования возможных возмущающих воздействий. Для этого к настоящему времени разработаны комбинированные методы и алгоритмы, являющиеся новыми модификациями метода локальных сечений Болтянского В.Г., метода ветвей и границ, метода пси-преобразований, метода основных осей Брента. Многовариантность и проактивность процессов планирования базируется на построении и аппроксимации областей достижимости (ОД) для рассматриваемых ЛДМ, потенциально содержащих все возможные комбинации вариантов (планов) распределения ресурсов Гр ПДО. Другое достоинство предложенного варианта формализации проактивного управления структурной динамикой ПДО состоит в том, что на его основе разработан специализированный язык описания и исследования как задач моделирования, планирования (коррекции планов, перепланирования), проактивного мониторинга и управления указанными объектами, так и задач диалогового взаимодействия, планирования вычислений, обработки данных и знаний. На программном уровне реализации данный язык базируется на нотации BPMN (Business Process Modelling Notation) и языке BPEL (Business Process Execution Language). И, наконец, самое главное, предлагаемый математический аппарат управляемой структурной динамики ПДО позволяет на данных объектах реализовать процессы целенаправленного выбора ими своей внутренней организации, что является проявлением основного свойства широкого класса самоорганизующихся сложных технических объектов (СТО) [1,2,8-10].

Комбинированные методы и алгоритмы решения задачи централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов

Рассмотрим основные особенности решения задач синтеза технологий и комплексных планов применения (функционирования) Гр ПДО при полностью децентрализованном (автономном) и региональном режимах ее функционирования [4,9-10]. При автономном варианте функционирования элементов Гр ПДО детерминированная задача

синтеза технологий и комплексных планов функционирования Гр ПДО сводится к задаче оптимального выбора в соответствующей бескоалиционной дифференциальной игре с непротивоположными интересами. При региональном варианте функционирования Гр ПДО формально задача планирования сводится к задаче оптимального выбора в коалиционной дифференциальной игре с непротивоположными интересами. Остановимся на основных этапах решения данных задач. При исследовании задач бескоалиционного выбора будем предполагать, что модели синтеза технологий и комплексных планов функционирования вида (1) можно привести к следующему описанию [2,7,9-10]:

$$\dot{x}_\mu = f_\mu(x_\mu, u_\mu, t), \quad (4)$$

$$u_\mu(t) \in Q(x_\mu), \quad (5)$$

$$x_\mu(t_0) = x_{\mu 0}; x_\mu(t_f) \in \mathbb{R}^{n_{об\mu}}, \quad (6)$$

$$J_{об\mu} = J_{об\mu}(x_1(t_f), x_1(t_f), \dots, x_m(t_f)), \quad (7)$$

где $\mu=1, \dots, m$; μ – заданный номер ПДО, осуществляющей взаимодействие с рассматриваемым классом целевых объектов (ЦО) состояние которых контролируют ПДО. Анализ построенных ЛДМ управляемой структурной динамики (УСД) Гр ПДО показывает, что указанное преобразование можно произвести, учитывая ряд технических и технологических ограничений при задании обобщенного терминального функционала (7), соответствующего обобщенному показателю качества $F(P(X, D([T_0, T_k])))$, введенному ранее при общей постановке исследуемой задачи. В этом случае алгоритм поиска равновесных программных управлений дифференциальной игры $B_1, B_2, \dots, B_m$ «лиц» (ПДО) включает в себя следующие три основных шага.

Шаг 1. Построение и аппроксимация для каждой подсистемы $B_1, B_2, \dots, B_m$ областей достижимости (ОД) $D(T_f, T_0, x_\mu, (T_0))$, соответствующих моменту окончания интервала планирования, используя методы и алгоритмы, предложенные авторами статьи в [1,2,7].

Шаг 2. Отыскание в пространстве состояний равновесной точки $x_1^{(pe)}, x_2^{(pe)}, \dots, x_m^{(pe)}$ системы функций $\{J_{об}(x_1(t_f), x_2(t_f), \dots, x_m(t_f))\}$, определенных на декартовом произведении $D(t_f, t_0, x_1(t_0)) \times D(t_f, t_0, x_2(t_0)) \times \dots \times D(t_f, t_0, x_m(t_0))$. В этом случае для поиска равновесных точек (точек Нэша) может использоваться итеративный алгоритм Брауна-Робинсона и его модификации [4].

Шаг 3. Построение программных управлений $u_\mu(t), t \in (t_0, t_f]$, переводящих каждую из динамических систем (4) – (7) из начального состояния (6) в конечное состояние $x_\mu(t_f) = x_\mu^{(pe)}$. Данная задача далее должна решаться в соответствии с вышеизложенным алгоритмом поиска комплексного плана проведения операций и управления структурами Гр ПДО (см. комбинированный метод и алгоритм, описанный в работе [7]), но уже применительно к B_μ подсистеме (ПДО).

При региональном планировании отдельные B_μ подсистемы (Гр ПДО) могут объединяться в группы (коалиции) для повышения уровня своих целевых и информационно-технологических возможностей (Ц и ИТВ), улучшения качества проведения операций взаимодействия (ОВ) с ЦО. В работах [1,9-10,11] показано, что расчет данных показателей целесообразно проводить на основе построения и аппроксимации соответствующих ОД для ЛДМ вида

$$\mathfrak{A}_\rho, \rho = 1, \dots, \mathfrak{R}; \mathfrak{A}_\rho \cap \mathfrak{A}_{\rho'} = \emptyset, \bigcup_{\rho=1}^{\mathfrak{R}} \mathfrak{A}_\rho = \mathfrak{Z}(M), \mathfrak{A} = \{\mathfrak{A}_1, \dots, \mathfrak{A}_\rho\}$$

(1), (4) – (7). В этом случае каждый ПДО B_μ может стать членом одной из коалиций $\mathfrak{A} \subseteq \mathfrak{Z}(M) = 2^m$, где $\mathfrak{Z}(M)$ – множество всех подмножеств, образованных из группировки Гр ПДО, и вступить только в одну коалицию. Таким образом, все множество ПДО $M = \{1, \dots, m\}$ разбивается на подмножества, соответствующие каждой из коалиций (групп ПДО, объединенных в подсистему). Множество $\mathfrak{A}$, представляющее из себя вариант разбиения множества всех ПДО M на подмножества, называется коалиционной структурой. Задача синтеза технологий и комплексных планов функционирования в указанной ситуации может рассматриваться как задача поиска равновесных программных управлений в дифференциальной игре $\mathfrak{R}$ «лиц» (коалиций, регионов). Основное её отличие от задачи (4)–(7) состоит в необходимости исследования вопросов целесообразности образования той или иной коалиции, обоснования и анализа принимаемых гипотез об информированности каждой из подсистем о действиях других подсистем, входящих в коалицию. В этом случае можно выделить три характерных случая взаимодействия коалиций.

Вариант α . Если подсистемам, составляющим коалицию $\mathfrak{A}_\rho$, неизвестна в целом коалиционная структура $\mathfrak{A}$, либо способы действия других коалиций $\mathfrak{A}_{\rho'}$, ($\rho, \rho' = 1, \dots, \mathfrak{R}$), входящих в коалиционную структуру $\mathfrak{A}$, то оптимальное программное управление следует искать руководствуясь принципом гарантированного результата:

$$J_{об\mathfrak{A}_\rho}(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}, \mathbf{u}_{M \setminus \mathfrak{A}_\rho}) \rightarrow \min_{\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}} \max_{\mathbf{u}_{M \setminus \mathfrak{A}_\rho}} \quad (8)$$

где $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}$ – вектор управляющих воздействий $\mathfrak{A}_\rho$ коалиции, $\mathbf{u}_{M \setminus \mathfrak{A}_\rho}$ – вектор управляющих воздействий, не входящих в коалицию $\mathfrak{A}_\rho$ ПДО, $\rho = 1, \dots, \mathfrak{R}$; M – общее число ПДО.

Интерпретация предлагаемого принципа применительно к вопросам, рассматриваемым при синтезе технологий и комплексных планов функционирования Гр ПДО, состоит в следующем. При поиске оптимальных программ управления элементами и подсистемами коалиции $\mathfrak{A}_\rho$ предполагается, что на интервале времени $(t_0, t_f]$ возможен выход из строя элементов и подсистем, входящих в коалицию $\mathfrak{A}_\rho$. В этом случае для коалиции $\mathfrak{A}_\rho$ ранее составленная программа работы коалиции $\mathfrak{A}_\rho$, (которую в указанной ситуации также необходимо выполнять) может рассматриваться как возмущающее воздействие, затрудняющее реализацию собственной программы управления.

Поэтому, составляя комплексный план работы коалиции, следует предусматривать варианты реконфигурации её структур на случай появления дополнительной информационной нагрузки. В этом случае поиск $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(t)$, как показывает анализ, сводится к многократной реализации процедур решения задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования для различных коалиций, дополненных алгоритмом проведения реконфигурации структур коалиции $\mathfrak{A}_\rho$ ($\rho = 1, \dots, \mathfrak{R}$).

Вариант β . Если подсистемам, составляющим коалицию $\mathfrak{A}_\rho$, известна коалиционная структура $\mathfrak{A}$, то возможны следующие подходы к решению задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования. Фиксируя варианты состава коалиции, решаются задачи (4)–(7) для $\mu = \rho, \rho = 1, \dots, \mathfrak{R}$. Если равновесных программ управлений $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(t)$ несколько, то целесообразно применить в этом случае метод доминирования риска Харсани-Нэша [3,4,9-10]. В указанной ситуации решаются следующие оптимизационные задачи:

$$J_{об} = \prod_{\rho=1}^{\mathfrak{R}} (J_{об\mathfrak{A}_\rho}(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(\cdot)) - J_{об\mathfrak{A}_\rho}(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(\cdot))) \rightarrow \min_{\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho} \in Q(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho})} \quad (9)$$

при дополнительном ограничении

$$J_{об\mathfrak{A}_\rho}(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(\cdot)) - J_{об\mathfrak{A}_\rho}(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(\cdot)) \geq 0, \quad (10)$$

где $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(t)$ – программное управление, полученное в результате решения задачи (4)–(7) при $\mu = \rho, \rho = 1, \dots, \mathfrak{R}$; $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(t)$ – программные управления, принадлежащие области Парето $Q^{(np)}(\mathbf{x}_{\mathfrak{A}})$. Таким образом, осуществляется поиск таких комплексных планов применения коалиций $\mathfrak{A}_\rho$ ($\rho = 1, \dots, \mathfrak{R}$), для которых паретовские решения $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(t)$ максимально приближаются к ранее полученным равновесным решениям $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(t)$.

Вариант γ . Если коалиционная структура $\mathfrak{A}$, в рамках которой образуется коалиция $\mathfrak{A}_\rho$, точно не известна, но известен конечный набор допустимых структур $\mathfrak{A} \in \mathfrak{N}$, в которые может входить коалиция $\mathfrak{A}_\rho$, то вариант β дополняется анализом целесообразности образования данной коалиции на множестве $\mathfrak{N}$. Выигрыш от вхождения ПДО B_μ в коалиции $\mathfrak{A}_\rho$ ($\rho = 1, \dots, \mathfrak{R}$) и образования данных коалиций оценивается исходя из анализа величин обобщенных показателей качества планирования $J_{об\mu}, J_{об\mathfrak{A}_\rho}$, для различных вариантов разбиения множества M на соответствующие коалиционные структуры. Следует подчеркнуть, что в рассматриваемом случае также, как и для **варианта α** реально существующие пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с процессом функционирования Гр ПДО, позволяют существенно уменьшить мощность множества допустимых коалиционных структур ($card\mathfrak{N}, card\mathfrak{A}$) и, тем самым, сократить затраты времени на поиск допустимого варианта взаимосвязи элементов, входящих в коалицию $\mathfrak{A}_\rho$.

При решении всех вышеизложенных задач децентрализованного и регионального планирования работы элементов и подсистем Гр ПДО необходимо каждый раз обосновывать выбор принципов оптимальности, положенных в основу принятых способов применения указанных систем управления, доказывать устойчивость указанных принципов оптимальности с учётом временных и технологических ограничений, накладываемых в целом на процесс планирования.

Недавно выполненные исследования вопросов специализации ПДО при решении задач сбора, передачи, хранения и обработки данных в ходе информационного взаимодействия данных ПДО показали, что получение конечным потребителем максимального количества информации (обработанных данных) о целевых объектах при минимальных потерях происходит, если использовать специализированные ПДО в смешанном составе [12]. Другими словами, при организации коалиционного (регионального) планирования ИнП при взаимодействии ПДО особую актуальность приобретает выбор оптимального соотношения многофункциональных и специализированных ПДО для выполнения целевых задач. Предложенные в статье модели и алгоритмы позволяют на конструктивном уровне решить данные задачи. Также в ходе машинных экспериментов было выявлено, что наибольшее влияние на конечные результаты планирования ИнП при взаимодействии Гр ПДО, которые характеризуются объемом и качеством полученной информации о ЦО, оказывает, во-первых, выбор в разработанном специальном модельно-алгоритмическом обеспечении (СМАО) коэффициентов согласования, характеризующих степень обработки информации, и коэффициентов, характеризующих важность показателей качества планирования, во-вторых, выбор общего количества подынтервалов постоянства топологической структуры каналов связи между ПДО (что определяется динамикой перемещения ПДО), а также собственно выбор характеристик аппаратно-программных комплексов (АПК) каждого ПДО, входящего в Гр.

Завершая рассмотрение этапов решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования Гр ПДО, ещё раз следует подчеркнуть, что окончательный выбор принципов, способов, методов, алгоритмов и программ управления элементами и подсистемами Гр ПДО с учётом конкретных условий обстановки осуществляет ЛПР, взаимодействуя в интерактивном режиме работы с разработанным программным обеспечением синтеза технологий и комплексных планов функционирования.

Заключение

Анализ современного состояния разработок в рассматриваемой предметной области, проведенный авторами статьи, показал, что наибольшее распространение при решении задач комплексного планирования применения группировки подвижных объектов получили следующие модели: сети Петри, модели, используемые в математическом программировании, модели Марковских и полумарковских цепей, модели, базирующиеся на байесовском и нечётко-возможностном подходах. Однако, к сожалению, эклектическое, несогласованное применение перечисленных частных моделей в условиях их большой размерности, нестационарности, нелинейности и неопределенности, используемых данных, не позволяет на практике синтезировать оперативные и обоснованные управленческие решения, связанные с организацией эффективного производства на распределенных промышленных мощностях.

В этих условиях объективно становится необходима разработка математического и программного обеспечения решения задач комплексного планирования применения Гр ПДО. В статье предложено обобщенное описание оригинальных логико-динамических моделей планирования применения Гр ПДО для случаев централизованного и децентрализованного планирования. Предложенная динамическая интерпретация планирования позволяет указанный процесс описать как процесс программного управления соответствующей динамической системой. В этом случае, используя метод локальных сечений (модификация методов, основанных на принципе максимума Л.С. Понтрягина) удается с единых системно-управленческих позиций подойти к формальному описанию и решению всего перечня децентрализованного планирования применения Гр ПДО, интерпретируя их как динамические задачи бескоалиционного, коалиционного, кооперативного оптимального выбора, численное (итерационное) решение которых предлагается осуществлять используя комбинированный метод, базирующийся на методе последовательных приближений и методе ветвей и границ. Более того, предложенные ЛДМ открывают широкие перспективы использования фундаментальных и прикладных научных результатов, полученных в классической и современной теории управления, для корректного решения широкого спектра прикладных задач организационно-технического управления [1-4, 7-11]. К настоящему времени данный подход получил многочисленную практическую реализацию при решении различных прикладных результатов в аэрокосмической, транспортно-логистической и судостроительных сферах [1, 2, 11, 12].

Литература

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С. 162–174.
2. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
3. Siliak D. D. Decentralized Control of Complex Systems, New York: Academic Press, 1991. 527 p.

4. Вайсборд Э. М., Жуковский В. И. Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. Москва: Советское радио, 1980. 304 с.
5. Ушаков В.А. Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3. Часть 1. С. 235—247.
6. Gorodetsky V., Larukchin V., Skobelev P. Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0 // In I. Kotenko et al. (Eds.): Proceedings of the International Conference on Intelligent Distributed Computing (IDC 2019), Studies in Computational Intelligence. 2019. Vol. 868. P. 35–40.
7. Соколов Б. В., Калинин В. Н Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1985. № 5. С. 106–114.
8. Искусственный интеллект в космической технике. Состояние и перспективы применения. Под редакцией Балухто А. Н. – М.: Радиотехника, 2021. 436 с.
9. Тур Анна В., Петросян Леон А. Кооперативные принципы оптимальности в дифференциальных играх на сетях // МТИП. 2020. 12:4. С. 93–111.
10. Petrosyan L. A., Yeung D., Pankratova Y. B. Cooperative Differential Games with Partner Sets on Networks // Труды ИММ УрО РАН. 2021. Т. 27. № 3. С. 286–295.
11. <http://litsam.ru>
12. Захаров В.В., Соколов Б.В., Ушаков В.А. Специальное модельно-алгоритмическое обеспечение планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных морских объектов // Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023). Труды конференции (ISBN 978-5-6050031-8-2). — СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. — 272 с. С.96-103.

References

1. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy koncepcii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnymi ob'ektami [Theoretical and technological foundations of the concept of proactive monitoring and management of complex objects], Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2015. No. 1(162). P. 162–174.
2. Mikoni S. V., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Kvalimetrija modelej i polimodel'nyh kompleksov [Qualimetry of models and polymodel complexes]. M.: RAN, 2018. 314 p.
3. Siliak D. D. Decentralized Control of Complex Systems, New York: Academic Press, 1991. 527 p.
4. Vaisbord E. M., Gukovskii V. I. Vvedenie v differencial'nye igry neskol'kih lic i ih prilozhenija [Introduction to differential games of several persons and their applications]. Moskva: Sovetskoy radio, 1980. 304 p.
5. Ushakov V. A. Modeli i algoritmy upravleniya informacionnymi processami pri vzaimodejstvii podvizhnykh ob'ektov [Models and algorithms for controlling information processes in the moving objects interaction]. Marine intellectual technologies. 2022. No. 3. Part 1. P. 235—247.
6. Gorodetsky V., Larukchin V., Skobelev P. Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0. In I. Kotenko et al. (Eds.): Proceedings of the International Conference on Intelligent Distributed Computing (IDC 2019), Studies in Computational Intelligence. 2019. Vol. 868. P. 35–40.
7. Sokolov B. V., Kalinin V. N. Dinamicheskaja model' i algoritm optimal'nogo planirovanija kompleksa rabot s zapretami na preryvanie [Dynamic model and algorithm of optimal planning of a complex of works with prohibitions on interruption]. Automation and Remote Control. 1985. No. 5. P. 106–114.
8. Iskustvennyj intellekt v kosmicheskoy tehnike. Sostojanie i perspektivy primenenija [Artificial intelligence in space technology. Status and prospects of application]. Ed. Balukhto A. N. – M.: Radiotekhnika, 2021. 436 s.
9. Tur Anna V., Petrosyan Leon A. Kooperativnye principy optimal'nosti v differencial'nyh igrach na setjah [Cooperative principles of optimality in differential games on networks]. MТИП. 2020. 12:4. P. 93–111.
10. Petrosyan L. A., Yeung D., Pankratova Y. B. Cooperative Differential Games with Partner Sets on Networks. Trudy IMM UrO RAN. 2021. Vol. 27. No. 3. S. 286–295.
11. <http://litsam.ru>
12. Zakharov V. V., Sokolov B. V., Ushakov V. A. Special'noe model'no-algoritmicheskoe obespechenie planirovanija informacionnykh processov pri vzaimodejstvii gruppировки podvizhnykh ob'ektov [Special model-algorithmic support for the planning of information processes in the interaction of the grouping of moving objects]. Sed'maja mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija "Imitacionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoy tehniki i morskikh transportnykh sistem" (IKM MTMTS- 2023). Trudy konferencii (ISBN 978-5-6050031-8-2). SPb.: IPK "NP-Print", 2023. — 272 p. P.96-103.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Захаров Валерий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: valeriov@yandex.ru

Баранов Антон Юрьевич, аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: yuiomer1337@gmail.com

Соколов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Юсупов Рафаэль Мидхатович, доктор технических наук, Член-корреспондент РАН, руководитель научного направления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: yusupov@iias.spb.su

Valerii V. Zakharov, Ph.D. (Eng), Assistant professor, Senior researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14th line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: valeriov@yandex.ru

Anton Yu. Baranov, graduate student, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14th line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: yuiomer1337@gmail.com

Boris V. Sokolov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Leading researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14th line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Rafael M. Yusupov, Dr. Sci. (Eng), Scientific chief, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14th line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: yusupov@iias.spb.su

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.09.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.09.2023.

Научная статья

УДК 656.6.058

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.022>

Информационное обеспечение безопасности объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути

Каминский В.Ю.¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Скороходов Д.А.¹ skorohodda@mail.ru¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье рассмотрены технологии информационного обеспечения системы управления безопасностью объектов инфраструктуры. Информационное обеспечение использует модели, описывающие процедуры сбора, обработки и передачи информации, порядок подготовки и принятия решений в рамках оперативного управления работой объектов инфраструктуры и их долгосрочного развития, а также содержит систему нормативных документов и законодательных актов, регламентирующих вопросы функционирования объектов. Рассмотрены требования к структуре баз данных и баз знаний системы управления безопасностью. Приведена структура базы данных (знаний), в которой каждый элемент системы управления безопасностью имеет собственную базу оперативной информации и базу знаний, конфигурация и содержание которых соответствует решаемым задачам. Разработан комплекс программных средств, который позволяет решать задачи моделирования зон распространения поражающих факторов, выполнять оценку масштаба и последствий аварии (социальный ущерб), вычислять риски возникновения аварий, предоставлять информацию пользователю и формировать отчеты. Проведена оценка возможности разработки структуры базы данных системы управления безопасностью, обеспечивающей информационные потребности всех расчетно-информационных задач. Проведена расчетная оценка надёжности оборудования объектов инфраструктуры и надёжности систем противоаварийной защиты. Представлен возможный сценарий развития аварии и её последствий. Приведена методика расчёта риска аварий.

Ключевые слова: безопасность, объект инфраструктуры, информация, риск, метод, база данных, модель, надёжность.

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН №075-01352-23-0 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (Соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 13.01.2023 №075-03-2023-431).

Для цитирования: Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Информационное обеспечение безопасности объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 179—188. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.022

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.022>

Information security of infrastructure facilities in the Arctic region and the Northern Sea Route

Valery Yu. Kaminsky¹ Kaminskyvy@yandex.ru, Dmitriy A. Skorokhodov¹ skorohodda@mail.ru¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The article discusses the technologies of information support for the security management system of infrastructure facilities. Information support uses models describing the procedures for collecting, processing and transmitting information, the procedure for preparing and making decisions within the operational management of infrastructure facilities and their long-term development and contains a system of regulatory documents and legislative acts regulating the functioning of facilities. The requirements for the structure of databases and knowledge bases of the security management system are considered. The structure of the database (knowledge) is given, in which each element of the security management system has its own database of operational information and knowledge base, the configuration and content of which correspond to the tasks being solved. A set of software tools has been developed that allows solving the tasks of modeling the distribution zones of damaging factors, assessing the scale and consequences of an accident (social damage), calculating the risks of accidents and providing information to the user, generating reports. An assessment of the possibility of developing a database structure of a security management system that provides information needs for all computational and information tasks was carried out. A calculated assessment of the reliability of the equipment of infrastructure facilities and the reliability of emergency protection systems was carried out. A possible scenario of the accident and its consequences is presented. The method of calculating the risk of accidents is given.

Keywords: security, infrastructure object, information, risk, method, database, model, reliability.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-01352-23-0 for 2023 and for the planned period of 2024 and 2025 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 13 January 2023 № 075-03-2023-431).

For citation: Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorohodov, Information support for the security of the infrastructure of the Arctic region and the Northern Sea Route, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 179—188. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.022

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры (ОИ) Арктического региона (АР) и Северного морского пути (СМП), являющихся частью мультимодальной транспортной системы (ММТС), связано с передачей подробной информации в систему управления безопасностью (СУБ) ММТС. Информационное обеспечение СУБ регламентирует процедуры сбора, обработки и передачи информации, а также порядок подготовки и принятия решений в области управления риском. Информационное обеспечение реализуется на основе информационных технологий [1], включающих совокупность методов, способов, приемов, средства обработки информации и регламентируемого порядка их применения.

Решение функциональных задач анализа и управления безопасностью объекта инфраструктуры

опирается на использование следующих информационных технологий [2]:

- *технология распределенных баз данных*, обеспечивающая как совместное, так и автономное решение задач автоматизированными подсистемами СУБ. Технология распределенных баз данных основана на автоматизированных банках данных и документах;
 - *технология распределенного преобразования информации*, обеспечивающая получение решения определенных функциональных задач на каждом уровне иерархии СУБ и позволяющая реализовать параллельное решение задач на всех уровнях иерархии управления объектом;
 - *CALS-технологии*, обеспечивающие поддержку ОИ на всех стадиях жизненного цикла - эксплуатация, ремонт, обслуживание и утилизация.
- В табл. 1 представлено краткое описание используемых технологий.

Таблица 1

Информационные технологии управления безопасностью объектов инфраструктуры

№ п/п	Наименование технологии	Назначение технологии	Применение технологии
1	Банки документов	Автоматизация документооборота на всех уровнях иерархии СУБ	На всех уровнях иерархии СУБ для решения функциональных задач управления ОИ и для взаимодействия с другими системами управления
2	Банки данных	Создание единого информационного пространства на основе общей структуры баз данных и единой системы кодификации информации	«---»
3	Распределенные базы данных	Обеспечение координированной деятельности различных подсистем СУБ	«---»
4	Распределенное преобразование информации	Совместная деятельность различных уровней иерархии управления ОИ	Решение функциональных задач различных уровней иерархии с возможностью параллельно-последовательного решения задач на всех уровнях иерархии управления ОИ
5	CALS (Computer Acquisition and Life-cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции)	Сопровождение ОИ на всех стадиях жизненного цикла	Использование при применении (эксплуатации), обслуживании, ремонте, хранении и утилизации элементов ОИ

Технология распределенного преобразования информации предполагает использование единого информационного пространства и оснащение каждого уровня управления безопасностью объекта комплексом программных средств для решения функциональных задач данного уровня, а также задач нижестоящих уровней управления.

Для обеспечения функционирования различных уровней управления безопасностью необходимо разработать единую систему кодификации информации со стандартным набором шаблонов документов.

Модельное обеспечение безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры

Совокупность моделей, обеспечивающих безопасную эксплуатацию объектов включает:

- модели, описывающие процедуры сбора, обработки и передачи информации;
- модели, описывающие процедуры подготовки и принятия решений в области оперативного управления работой ОИ и их долгосрочного развития;
- систему нормативных документов и законодательных актов, регламентирующих вопросы функционирования ОИ.

Итак, для решения задач прогнозирования развития и координированного управления работой ОИ, в состав информационной системы должен входить развитый комплекс модельного обеспечения [1, 3]. Модельное обеспечение представляет собой совокупность моделей, описывающих различные аспекты существования объекта инфраструктуры и содержит следующие группы:

- прогнозные модели для решения задач прогнозирования развития ММТС, ОИ и их отдельных элементов;
- модели развития, реализующие поиск и формирование оценки эффективности различных вариантов развития ОИ;
- модели взаимодействия, устанавливающие взаимодействие различных элементов ОИ;
- модели управления, описывающие процессы управления функционированием и развитием ОИ;
- модели потоков - транспортных, информационных и энергетических в ОИ;
- экономические модели ММТС;
- экологические модели оценки и прогнозирования изменения состояния окружающей среды;
- модели аварий для прогнозирования возможного развития ситуаций при авариях на ОИ;
- модели документооборота, описывающие процедуры обмена информацией между различными элементами ОИ и систему нормативных документов.

Комплекс моделей, используемых для описания ОИ, должен обеспечивать:

- единство используемого формального аппарата;
- построение стратифицированного комплекса моделей, в котором каждая вершина описывается собственной моделью.
- возможность решения задач анализа и синтеза с различным числом уровней стратификации, которое определяется необходимой глубиной анализа.
- возможность сопряжения моделей по схеме вход-выход, когда результат, полученный на выходе одной модели, является входным для другой;
- возможность выполнения расчетов от входа к выходу и от выхода ко входу с вычислением параметров на основе комплексных критериев (аддитивных, мультипликативных и т.п.).

Создание программного обеспечения и базы данных системы управления безопасностью объекта

Система управления безопасностью является распределенной вычислительной системой, каждый узел которой предназначен для решения задач сбора, обработки и хранения оперативной информации. Все узлы СУБ должны иметь доступ к специализированным структурам данных, обеспечивающим решение задач.

Рассмотрим требования к банкам данных и знаний СУБ для построения надежной, с точки зрения обеспечения целостности и сохранности информации, и эффективной, с точки зрения простоты и удобства доступа к информации, структуры.

Структура баз данных и знаний СУБ, а также системы управления базами должны обеспечивать:

- надежность и живучесть системы управления ОИ;
- оперативность обработки запросов и предоставления информации;
- актуальность информации - соответствие имеющейся в СУБ информации об объекте инфраструктуры его действительному состоянию;
- эффективность и удобство обработки информации, достигаемое за счет использования эффективных и надежных алгоритмов;
- эффективность и удобство доступа к данным за счет построения оптимальной структуры соответствующей базы;
- релевантность информации, а также исключение ошибок первого и второго рода (ложноположительное и ложноотрицательное заключения);
- экономическую эффективность СУБ, выражающуюся в том, что затраты на обработку, передачу и хранение основной и резервной информации, а также обслуживание баз данных и знаний не должны превышать значений, снижающих экономический эффект от внедрения системы;
- исключение различного рода аномалий, включая аномалии добавления, изменения, удаления, хранения и преобразования информации.

Эффективные структуры баз данных оперативной информации (БДОИ), документов (БД) и знаний (БЗ) являются залогом построения эффективных алгоритмов управления данными и знаниями, а, следовательно, они в значительной мере определяют эффективность функционирования систем управления базой данных и базой знаний. В свою очередь, эффективность доступа к данным, определяет такие существенные характеристики СУБ как производительность, готовность и живучесть [4].

В наибольшей мере указанным требованиям удовлетворяет технология баз данных (знаний) объектной структуры или распределенных баз данных. В рамках этой технологии каждый элемент СУБ имеет свою базу данных оперативной информации и базу знаний, структура и содержание которой соответствует задачам, решаемым этим элементом.

Построение распределенных баз данных и знаний СУБ позволяет:

- повысить надежность и живучесть СУБ, за счет обеспечения информационной избыточности;
- повысить оперативность обработки запросов за счет сокращения времени, требуемого на доступ к данным;
- разработать эффективные структуры баз данных (знаний) и алгоритмы обработки информации для каждого элемента СУБ;
- обеспечить своевременную актуализацию информации, позволяющую, каждому из элементов СУБ, принимать эффективные и адекватные решения по управлению готовностью;
- сократить время принятия решений (управляющих воздействий) и повысить их достоверность за счет повышения надежности и эффективности доступа к информации (данным и знаниям), актуальности информации и т.д.

При использовании распределенных баз возможно сократить обмен информацией между различными уровнями СУБ и повысить компетентность элементов СУБ. Каждый узел СУБ передает другим узлам только ту информацию, которая необходима им для выработки управляющих или координирующих решений. Однако, при этом возникает проблема координации деятельности узлов СУБ и остро встает вопрос обеспечения надежности и живучести СУБ, т.к. отказ отдельных узлов СУБ может привести к необратимой потере части информации, а также к потере СУБ способности управлять объектом принятия решений.

Повысить надежность и живучесть распределенной СУБ можно за счет:

- дублирования вычислительных устройств элементов принятия решений, БДОИ и БЗ, обеспечивающего аппаратную и информационную избыточность;
- построения сетей с открытой конфигурацией, обеспечивающего алгоритмическую и информационную избыточность;
- реализации комплексного решения, обеспечивающего аппаратную, алгоритмическую и информационную избыточность.

В процессе разработки системы управления безопасностью в парадигме распределенной вычислительной системы, необходимо сформировать такие структуры БДОИ, БЗ и программных средств управления базами, чтобы обеспечить компромисс между надежностью системы и ее экономической эффективностью.

Архитектура комплекса программного обеспечения системы управления безопасностью

Комплекс программных средств для информационной поддержки процессов принятия решений по обеспечению экологической безопасности при возникновении крупных аварий на объектах инфраструктуры позволяет решать следующие задачи [5 - 7]:

- моделирование зон распространения поражающих факторов;
- оценка масштаба и последствий аварии (социальный ущерб);
- формирование отчетов;
- оценка рисков возникновения аварий;
- представление информации пользователю.

Концептуальное моделирование структуры комплекса программных средств, рис. 1, содержит следующие модули.

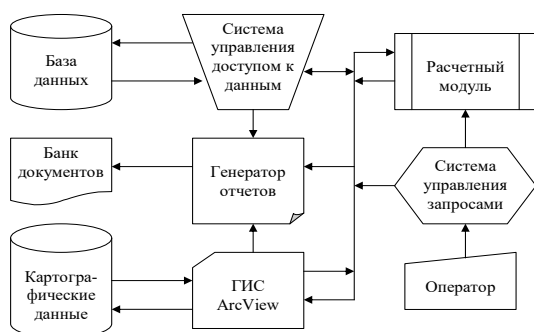


Рис. 1. Структура программного комплекса

1. Фактографическая база данных с информационными массивами:

- данные об авариях с опасными веществами;
 - данные о потенциально опасных объектах;
 - данные об инфраструктуре (здания, объекты инфраструктуры, природные и ландшафтные объекты и т.п.) и распределении населения;
 - данные об опасных веществах;
 - данные о погодно-климатических условиях;
2. Система управления доступом к данным.
3. Геоинформационная система (ГИС) для получения данных из картографической базы данных (координаты элементов, их геометрические размеры и т.п.).
4. Генератор отчетов для формирования итоговых текстовых и графических отчетных документов. Документы формируются по результатам расчетов и по запросам пользователя на основе сведений, содержащихся в фактографической базе данных.
5. Система управления запросами для выбора режима работы (моделирования).
6. Расчетный модуль, обеспечивающий решение задач моделирования, оценку масштабов и последствий аварий.

Основой комплекса программных средств является расчетный модуль, структура которого приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структура расчетного модуля

В состав расчетного модуля входят следующие блоки:

1. Блок подготовки исходных данных, обеспечивает ввод сведений об аварии, погодной обстановке в районе аварии и выбор алгоритма расчета. В составе блока выделяются два функциональных элемента:
 - блок ввода первичных данных об аварии с опасными веществами;
 - блок ввода сведений о погодно-климатических условиях в районе аварии.
2. Блок моделирования, обеспечивает расчет зон распространения потенциально опасных факторов, выполняет оценку последствий и масштабов аварий на основе сведений о распределении населения и застройке в зоне поражения.
3. Блок управления данными обеспечивает связь расчетного модуля с фактографической базой данных.
4. Графический (картографический) блок обеспечивает подготовку информации, а также обработку запросов и сообщений, получаемых от геоинформационной системы.

5. Интерфейсный блок обеспечивает связь расчетного модуля с ГИС.

6. Блок корректировки справочников обеспечивает ввод и корректировку сведений по опасным веществам и объектам и включает в себя следующие компоненты:

- блок корректировки сведений по опасным веществам;
- блок корректировки сведений по опасным объектам;

В процессе проектирования программного обеспечения указанные блоки расчетного модуля оформляются в виде независимых, функционально связанных элементов. По результатам анализа возможно уточнение состава и функций отдельных блоков.

Структура базы данных системы управления безопасностью

Разработаем структуру базы данных, обеспечивающую информационные потребности всех расчетно-информационных задач [8 - 10].

Данные, используемые при оценке масштабов аварий, можно условно разделить на два типа: смысловая текстовая информация и информация графическая. Соответственно, база данных содержит две составляющие: фактографическую и картографическую.

Фактографическая база включает смысловые сведения об объектах (название, код/номер, назначение, наличие людей, сменность работы, признаки опасности объекта, наличие на объекте потенциально опасных процессов и веществ, устойчивость объекта к опасным и поражающим факторам и т.п.).

Картографическая база данных – совокупность графических сведений об объектах инфраструктуры: геометрические размеры, координаты (в единой системе координат) и др.

В рамках разработки фактографической базы данных, рассмотрим компоненты, обеспечивающих решение расчетно-информационных задач (РИЗ). Для чего требуется сформировать следующие информационные массивы:

- сведения о потенциально опасных ОИ;
- сведения о произошедших авариях;
- результаты моделирования аварий;
- сведения об ОИ;
- сведения о численности населения и его структуре с привязкой к объектам инфраструктуры.

В общем случае база данных представляет собой совокупность информационных слоев (файлов данных), каждый из которых описывает фиксированный класс объектов предметной области. В структуре базы данных предусмотрено использование следующих тематических слоев:

- каталог ОИ с привязкой к электронной карте;
- информация о текущей метеорологической обстановке в заданном районе;
- информация о факте возникновения аварии;
- массивы результатов моделирования возможных последствий аварии.
- данные о защищенности объектов;
- формирование выборки объектов, попавших в зоны поражения различной степени тяжести при аварии.

Методика анализа риска объектов инфраструктуры

Процедура анализа риска включает в себя шесть этапов [11 - 13]:

- анализ надежности основного технологического оборудования;
- анализ надежности системы противоаварийной защиты;
- анализ сценариев развития аварии;
- оценка последствий аварии;
- расчет значений показателей риска;
- выработка рекомендаций по управлению риском.

Процесс анализа риска, в общем случае, реализуется в рамках итерационной процедуры, когда на каждом текущем этапе анализа учитываются результаты, полученные на этапе предыдущем. Реализация (планирование) мероприятий по управлению риском приводит к изменению структуры и характеристик основного оборудования, а также к трансформации систем защиты. Это значит, что любое принятое решение должно приводить к изменению полученных ранее показателей риска.

Рассмотрим содержание указанных этапов анализа риска.

Анализ надежности объекта инфраструктуры

Данный этап предполагает изучение ОИ и создание системы моделей, описывающих функционирование технологического оборудования в штатных режимах использования.

Источником данных для разработки моделей являются:

- описание технологического процесса ОИ;
- структурные, функциональные и технологические схемы ОИ;
- сведения о режимах работы, характеристиках надежности и иных характеристиках основного и вспомогательного технологического оборудования.

Целью этапа является анализ надежности основного и вспомогательного технологического оборудования, а также трубопроводов и кабельных связей, направленный на выявление «слабых» мест и оценку вероятности возникновения опасных ситуаций вследствие отказов оборудования.

Функции управления риском заключаются в организации технического обслуживания и ремонта, позволяющего исключить отказы оборудования ОИ в период между регламентными работами и повышающие надежность оборудования.

В процессе анализа надежности объектов инфраструктуры необходимо разработать многоуровневый стратифицированный комплекс моделей. Количество уровней и глубина детализации схем определяется задачами моделирования. На верхних уровнях комплексной иерархии предметом анализа является структура объекта исследования и функциональные связи между различными элементами ОИ.

На нижних иерархических уровнях анализируется функциональная структура объекта и особенности технологического процесса. При анализе работы оборудования ОИ учитывается собственная надежность объекта, а также надежность систем снабжения электроэнергией, водой, топливом и другими необходимыми ресурсами.

Оборудование, в схемах нижнего уровня можно условно разделить на три группы:

- основное технологическое оборудование, обеспечивающее выполнение технологического процесса - для описания технологического процесса используется модель надежности;
- защитное оборудование, обеспечивающее защиту при возникновении потенциально опасных ситуаций - для описания функционирования защитного оборудования используется модель безопасности;
- трубопроводы и другое вспомогательное оборудование (например, приводы насосов и т.п.).

Для анализа надежности ОИ необходимо сформировать банк данных, содержащий сведения по надежности, защищенности и другим характеристикам оборудования, а также разработать модели, описывающие штатное функционирование ОИ и его элементов.

Входной информацией являются показатели надежности и технического состояния оборудования ОИ. Выходная информация - вероятность безотказной работы или вероятности отказа оборудования, узлов, блоков и ОИ в целом.

Анализ надежности системы противоаварийной защиты

На этапе выполняется обследование объекта и создаётся комплекс моделей, описывающих функционирование технологического оборудования ОИ и систем противоаварийной защиты при опасных отклонениях технологических параметров.

Источником данных для разработки моделей являются:

- описание технологического процесса ОИ;
- структурные, функциональные и технологические схемы ОИ;
- описание и схемы системы противоаварийной защиты
- сведения о режимах работы, характеристиках надежности и иных характеристиках оборудования систем защиты.

Целью является анализ надежности систем противоаварийной защиты, направленный на выявление «слабых» мест и оценку вероятности возникновения потенциально опасных ситуаций вследствие отказов технологического оборудования и систем защиты.

Функции управления заключаются в организации системы технического обслуживания и ремонта средств противоаварийной защиты для исключения отказов оборудования и повышения надежности систем противоаварийной защиты.

Общая методология анализа надежности систем аварийной защиты, в основном, аналогична методологии анализа основного оборудования. Существенной особенностью является использование результатов анализа потенциально опасных ситуаций.

Для анализа необходимо сформировать банк данных, содержащий сведения по надежности, защищенности и другим характеристикам оборудования и устройств защиты, а также разработать модели, описывающие функционирование устройств защиты при возникновении опасных ситуаций.

Входной информацией являются показатели надежности, а также технического состояния оборудования и устройств защиты. Выходная информация - вероятность безотказной работы или вероятность отказа устройств защиты, а также вероятность возникновения опасной ситуации вследствие неспособности системы защиты исключить развитие опасных процессов.

Анализ сценариев развития аварии объекта инфраструктуры

Проводится исследование возможных вариантов развития аварии, определяются факторы, способствующие или препятствующие развитию аварии, а также формируется комплекс моделей для описания выделенных аварийных сценариев. Целью анализа является определение возможных вариантов развития аварии.

Функция управления заключается в организации инженерно-технических мероприятий, направленных на исключение факторов, вызывающих каскадное развитие аварии (рис.3).

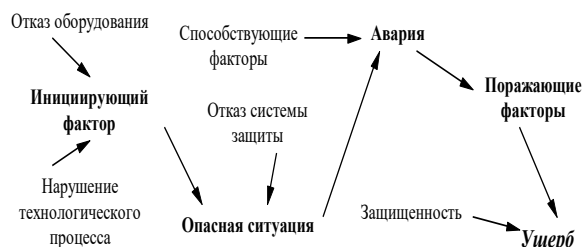


Рис. 3. Типовой сценарий развития аварии

Для анализа аварийного сценария необходимо:

- выделить потенциально опасные факторы аварии, приводящие к выходу параметров технологического процесса за допустимые пределы с последующим возникновением опасных ситуаций;
- каждому опасному фактору сопоставить возможные опасные ситуации. Под опасной ситуацией понимается состояние оборудования, узла, блока или объекта, когда возникает потенциальная возможность аварии: разрушение оборудования, утечка или выброс опасных веществ и т.п.
- для каждой опасной ситуации назначить перечень факторов, способствующих или препятствующих возникновению аварии;
- определить поражающие факторы, сопровождающие аварию при определенных условиях.

Для анализа сценариев развития аварий формируется банк данных, содержащий сведения по надежности, защищенности и другим характеристикам оборудования и устройств защиты, а также создаются модели для изучения развития опасных ситуаций и влияния сопутствующих факторов.

Входной информацией являются вероятности безотказной работы оборудования и устройств защиты. Выходная информация - вероятность возникновения различных аварийных ситуаций.

Оценка последствий аварии объекта инфраструктуры

Исследуются все возможные варианты развития аварии и выполняется оценка их вероятных последствий. Мерой оценки последствий, в зависимости от решаемой задачи, является ущерб. При оценке социального риска мерой ущерба являются жертвы среди обслуживающего персонала и гражданского населения, а при оценке технического риска - возможные разрушения оборудования и т.п.

Цель анализа - определение возможного ущерба от аварии, оценка возможных потерь.

Функции управления - оповещение персонала, введение в действие планов эвакуации и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Оценка последствий выполняется в рамках комплекса аналитических моделей, описывающих потенциально возможные для рассматриваемого ОИ, виды аварий.

Обобщенная классификация аварий приведена в табл. 2.

Таблица 2

Классификация последствий аварий

Опасная ситуация	Сценарий аварии	Последствия	Вероятность возникновения
Разгерметизация оборудования, мелкая течь	образование пролива	пожар	низкая
	образование газового облака	взрыв облака	низкая
Повреждение и разгерметизация оборудования, крупная течь	образование пролива	пожар	высокая
	образование газового облака	взрыв облака, факельное горение, огненный шар	высокая, средняя, низкая
	образование токсичного газового облака	взрыв, химическое заражение	высокая
Разрушение оборудования, выброс больших объемов вещества	образование пролива	пожар, взрыв	высокая
	образование газового облака	факельное горение, взрыв облака, огненный шар	высокая, высокая, низкая
	образование токсичного газового облака	взрыв, химическое заражение	высокая

При анализе последствий аварий необходимо рассматривать возможные сценарии с учетом различных факторов. Формирование моделей аварий включает три этапа и проводится с учетом особенностей технологического процесса и механизмов функционирования защитных систем.

На первом этапе определяются потенциально опасные ситуации и их возможные последствия:

- выброс больших объемов сырья под давлением в результате разрушения оборудования;
- крупная течь в результате появления нарушения герметичности или появления дефектов оборудования (например, трещин);
- мелкая течь в результате нарушения герметичности.

На втором этапе определяются факторы, в зависимости от класса выбрасываемого вещества и вида опасной ситуации, способствующие возникновению и развитию аварии.

Например, если рабочим телом является летучая легко воспламеняемая жидкость, то факторами опасности выступают источники открытого огня, искрения и нагретых поверхностей.

На третьем этапе определяются сценарии развития аварии и формируется модель развития аварии.

Определение риска аварии объекта инфраструктуры и коммуникаций

Риск аварии R определяется как математическое ожидание вероятности возникновения потенциально опасных факторов и возможного ущерба от аварии:

$$R = p_{\text{оф}} \cdot C,$$

где $p_{\text{оф}}$ - вероятность проявления потенциально опасных факторов, следствием которых может быть

авария; C - ожидаемый ущерб от действия рассматриваемых опасных факторов в случае возникновения аварии.

Вероятность $p_{\text{оф}}$ является функцией надежности различных групп оборудования, эффективности функционирования персонала, условий, способствующих развитию аварий и вычисляется с использованием моделей надежности и безопасности:

$$p_{\text{оф}} = f(H_{\text{оо}}, H_{\text{аз}}, H_{\text{во}}, H_{\text{п}}, \text{ОФ}),$$

где $H_{\text{оо}}$, $H_{\text{аз}}$, $H_{\text{во}}$ - надежность основного оборудования, аварийной защиты, и вспомогательного оборудования соответственно; $H_{\text{п}}$ - надежность, обеспеченная компетентностью обслуживающего персонала (операторов) установки; ОФ - наличие условий развития аварии с учетом опасных факторов (вероятность или интенсивность возникновения).

Ожидаемый ущерб (C) определяется в рамках моделей оценки последствий аварий. На основании сведений о месте аварии, действующих опасных факторах (ударная волна, термическое воздействие, химическое заражение), объеме и составе участвующих в аварии опасных веществ рассчитываются зоны поражения и, с использованием картографического блока СУБ, определяются объекты, попавшие в зоны поражения. В зависимости от критерия, выбранного для оценки риска (социальный риск, территориальный риск и т.д.), определяется ожидаемый ущерб либо в форме материальных потерь от аварии (прямых и косвенных), либо как число возможных жертв аварии.

В качестве языка описания моделей используется аппарат схем функциональной целостности [14], удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к моделям, используемым для анализа риска.

Как показывает статистика, причинами аварии ОИ выступают отказы или разрушение оборудования (емкости, насосы, краны и т.п.) или внешние воздействия (удары, взрывы, пожары, природные бедствия и т.д.).

В большинстве случаев развитие аварии непосредственно не приводит к проявлению опасных факторов – разрушению зданий и оборудования (при взрывах и пожарах), поражению населения. Проявление подобных факторов возникает, в большинстве случаев, только при наличии сопутствующих условий, в частности:

- для химической аварии – температура окружающей среды, сила и направление ветра, состояние атмосферы;
- для взрывов и пожаров – наличие взрывопожароопасных концентраций вещества, наличие источников огня или нагрева, наличие избыточного давления в емкостях и трубопроводах.

В частности, анализ риска при эксплуатации коммуникаций включает следующие этапы:

- расчет вероятности возникновения аварий на коммуникациях;
- моделирование негативных последствий при авариях;
- построение зон потенциального территориального риска;
- оценка социального риска при аварии.

Заключение

1. Для обеспечения функционирования различных уровней управления безопасностью ОИ необходимо создать единую систему кодификации информации и выработать стандартный набор шаблонов документов, существующих в едином информационном пространстве, оснастить каждый уровень управления безопасностью ОИ комплексом программных средств для решения функциональных

задач данного уровня, а также обеспечить решения задач нижестоящих уровней иерархии.

2. Комплекс моделей, используемых для описания ОИ, должен включать процедуры сбора, обработки и передачи информации, а также подготовки и принятия решений для оперативного и долгосрочного управления работой объекта, содержать систему нормативных документов и законодательных актов, регламентирующих вопросы функционирования ОИ.

3. Построение распределенных баз данных и знаний СУБ позволяет повысить надежность и живучесть системы, обеспечивает оперативность обработки запросов, формирует эффективные структуры баз данных (знаний) и алгоритмы обработки информации для каждого элемента СУБ, позволяет принимать адекватные решения по управлению готовностью, сокращает время принятия решений и повышает их достоверность.

4. Программный комплекс должен обеспечивать моделирование зон распределения поражающих факторов, выполнять оценку масштаба и последствий аварии (социальный ущерб), формировать отчеты по результатам моделирования, проводить оценку рисков возникновения аварий и представлять информацию пользователю.

5. Данные, используемые при оценке масштабов аварий, можно разделить на два типа: смысловая текстовая информация и информация графическая. Соответственно, база данных включает в себя две компоненты: фактографическую и картографическую.

6. Разработаны основные блоки методики анализа надёжности ОИ, предполагающей обследование объекта и создание системы моделей, описывающих функционирование технологического оборудования в штатных режимах использования и в рамках различных аварийных сценариев с оценкой их последствий.

Литература

1. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Васьков В. Т. Теоретические основы оптимального наблюдения параметров работы объектов инфраструктуры Арктического региона и Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-1(61). С. 163-169.
2. Гурлев И. В., Макоско А. А., Малыгин И. Г., Каминский В. Ю. Интеллектуализация транспортной системы Северного морского пути // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 228-235.
3. Скороходов Д. А., Степанов И. В., Турусов С. Н., Никитин Н. В. Применение инструментов анализа рисков при создании решающих правил систем поддержки принятия решений // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 114-120.
4. 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.
5. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Королев О. А. Информационная система поддержки принятия решения при борьбе за живучесть судна // в сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2018. С. 93-99.
6. Латынцева С.В., Степанов И.В., Филиппов С.В. Управление жизненным циклом структурированных систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XVII всероссийской научно-практической конференции. М., 2014. С. 592-601.
7. Степанов И.В., Турусов С.Н., Кузнецов С.Л. Принципы создания и применения систем поддержки принятия решений в чрезвычайных ситуациях // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XVII всероссийской научно-практической конференции. М., 2014. С. 602-608.
8. Ибадулаев В.А., Степанов И.В., Турусов С.Н. Принятие решений по управлению готовностью сложных систем // Актуальные проблемы защиты и безопасности – 2002. Труды всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2002. С. 184-189.
9. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А., Стариченков А. Л., Никитин Н. В. Имитационная модель оценки безопасности водного транспорта // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-1(54). С. 20-27.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., Высш. шк., 2001. 575 с.

11. Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Принципы построения интеллектуальной системы экологической безопасности и навигационного сопровождения мультимодальных перевозок отработавшего ядерного топлива // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1(60). С. 226-235.
12. Александров М.А., Скороходов Д.А. Анализ методики и алгоритма оценки надёжности объекта транспортной системы при произвольных законах распределения // Морской вестник. 2013. №4(48). С.100-102.
13. Латынцева С. В., Степанов И. В., Яценко В. В. Интегрированный подход к исследованию рисков в области промышленной безопасности // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXIII всероссийской научно-практической конференции. М., 2020. С. 180-188.
14. Грузинов В.М., Зворыкина В.Е., Иванов Г.В., Сычев Ю.Ф., Тарасова О.В., Филин Б.Н. Арктические транспортные магистрали на суше, акваториях и в воздушном пространстве // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1 (33). С.6 – 20.

References

1. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Vas'kov V. T. Teoreticheskie osnovy optimal'nogo nablyudeniya parametrov raboty ob"ektov infrastruktury Arkticheskogo regiona i Severnogo morskogo puti [Theoretical foundations of optimal monitoring of the parameters of the infrastructure of the Arctic region and the Northern Sea Route] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 3-1(61). pp. 163-169.
2. Gurlev I. V., Makosko A. A., Malygin I. G., Kaminsky V. Yu. Intellektualizatsiya transportnoj sistemy Severnogo morskogo puti [Intellectualization of the Northern Sea Route transport system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 3-1(53). pp. 228-235.
3. Skorohodov D. A., Stepanov I. V., Turusov S. N., Nikitin N. V. Primenenie instrumentov analiza riskov pri sozdanii reshayushchih pravil sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Application of risk analysis tools in the creation of decisive rules of decision support systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 3-3 (45). pp. 114-120.
4. 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.
5. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Korolev O. A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri bor'be za zhivuchest' sudna [Information system to support decision-making in the fight for the survivability of the vessel] // v sbornike: Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem. Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg, 2018. pp. 93-99.
6. Latynceva S.V., Stepanov I.V., Filippov S.V. Upravlenie zhiznennym ciklom strukturirovannyh sistem monitoringa i upravleniya inzhenernymi sistemami zdaniy i sooruzhenij [Life cycle management of structured monitoring and management systems for engineering systems of buildings and structures] // Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti. Trudy XVII vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. M., 2014. pp. 592-601.
7. Stepanov I.V., Turusov S.N., Kuznecov S.L. Principy sozdaniya i primeneniya sistem podderzhki prinyatiya reshenij v chrezvychajnyh situatsiyah [Principles of creation and application of decision support systems in emergencies] // Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti. Trudy XVII vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. M., 2014. pp. 602-608.
8. Ibadulaev V.A., Stepanov I.V., Turusov S.N. Prinyatie reshenij po upravleniyu gotovnost'yu slozhnyh sistem [Decision-making on readiness management of complex systems] // Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti – 2002. Trudy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg, 2002. pp. 184-189.
9. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A., Starichenkov A. L., Nikitin N. V. Imitacionnaya model' ocenki bezopasnosti vodnogo transporta [Имитационная модель оценки безопасности водного транспорта] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 4-1(54). pp. 20-27.
10. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej [Probability theory]. M., Vyssh. shk., 2001. 575 p.
11. Kaminsky V. Yu., Skorohodov D. A. Principy postroeniya intellektual'noj sistemy ekologicheskoy bezopasnosti i navigacionnogo soprovozhdeniya mul'timodal'nyh perevozok otrabotavshego yadernogo topliva [Principles of building an intelligent environmental safety system and navigation support for multimodal transportation of spent nuclear fuel] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2023. № 2-1(60). pp. 226-235.
12. Aleksandrov M.A., Skorohodov D.A. Analiz metodiki i algoritma ocenki nadyozhnosti ob"ekta transportnoj sistemy pri proizvol'nyh zakonah raspredeleniya [Analysis of the methodology and algorithm for assessing the reliability of a transport system object under arbitrary distribution laws] // Morskoj vestnik. 2013. №4(48). pp. 100-102.
13. Latynceva S. V., Stepanov I. V., YAshchenko V. V. Integrirovannyj podhod k issledovaniyu riskov v oblasti promyshlennoj bezopasnosti [Integrated approach to risk research in the field of industrial safety] // Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti. Trudy XXIII vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. M., 2020. pp. 180-188.
14. Gruzinov V.M., Zvorykina V.E., Ivanov G.V., Sychev YU.F., Tarasova O.V., Filin B.N. Arkticheskie transportnye magistrali na sushe, akvatoriyah i v vozdushnom prostranstve [Arctic transport highways on land, water areas and in the airspace] // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2019. № 1 (33). pp.6 – 20.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Каминский Валерий Юрьевич, 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

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, Ph.D. (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

Скороходов Дмитрий Алексеевич, 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; профессор кафедры, e-mail: skorohodda@mail.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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 31.10.2023

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.11.2023

Принята к публикации/accepted for publication 09.11.2023

Научная статья

УДК 629.5, 504.7, 51-74

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.023>**Применение системного подхода для сбалансированной экологической оценки судов на водородном топливе**Королева Л.А.¹ lyudamil@mail.ru, Малыгин И.Г.² malygin_com@mail.ru¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, ²Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. Ключевыми факторами устойчивого развития экономики и общества являются энергетическая безопасность, снижение загрязнения окружающей среды, предотвращение изменений климата. Переход судов на водородное топливо значительно снижает выбросы парниковых газов и является актуальной задачей. Цель работы заключается в проведении сбалансированной экологической оценки судов на водородном топливе с использованием системного подхода метода анализа иерархий. Определено, что широкому распространению водородной энергетики препятствует наличие технических, стоимостных и институциональных проблем. Наиболее экологически чистым и дорогим способом (электролизом воды) получают около 4% водорода. Для оценки перспектив развития водного транспорта на водородном топливе применен метод анализа иерархий. Обоснованы преимущества данного метода исследований. Приведена последовательность действий при его реализации. Доказано, что при создании инновационных судов экологические проблемы необходимо решать в комплексе с энергетическими, экономическими, технологическими проблемами и вопросами обеспечения безопасности. Разработана система критериев для экологической оценки судов, использующих различные источники энергии. Оценка проведена по трем уровням. Выявление глобальных приоритетов позволило дать сбалансированную экологическую оценку судов на водородном топливе. Реализация предлагаемого подхода дает возможность учитывать влияние изменяющихся внешних условий при проведении оценки перспектив развития «водородного направления» в судостроении. Переход на водородное топливо хорошо согласуется с Климатической доктриной Российской Федерации и международными стратегиями по сокращению выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: устойчивое развитие, экологическая оценка, парниковые газы, судно, судовая энергетическая установка, альтернативные виды топлива, водород, метод анализа иерархий, системный подход

Финансирование: работа выполнена в рамках исполнения государственного задания ИПТ РАН №075-01352-23-0 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов за счет средств предоставленной Минобрнауки России субсидии (соглашение о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания от 13.01.2023 №075-03-2023-431)

Для цитирования: Королева Л.А., Малыгин И.Г. Применение системного подхода для сбалансированной экологической оценки судов на водородном топливе // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 189—196. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.023

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.023>**Application of a systematic approach for a balanced environmental assessment of hydrogen-fueled vessels**Lyudmila A. Koroleva¹ lyudamil@mail.ru, Igor G. Malygin² malygin_com@mail.ru¹Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, ²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, St. Petersburg Russian Federation

Abstract. The key factors of sustainable development are energy security, reduction of environmental pollution, prevention of climate change. The transition of ships to hydrogen fuel significantly reduces greenhouse gas emissions and is an urgent task. The purpose of the work is to conduct a balanced environmental assessment of hydrogen fuel ships using a systematic approach to the hierarchy analysis method. It is determined that the widespread use of hydrogen energy is hindered by the presence of technical, cost and institutional problems. The most environmentally friendly and expensive method (electrolysis of water) produces about 4% hydrogen. To assess the prospects for the development of hydrogen-fueled water transport, the method of hierarchy analysis was applied. Its advantages are justified. The sequence of actions for its implementation is given. It is proved that when creating innovative vessels, environmental problems must be solved in combination with energy, economic, technological problems and safety issues. A system of criteria for environmental assessment of vessels using various energy sources has been developed. The assessment was carried out on three levels. The identification of global priorities made it possible to give a balanced environmental assessment of hydrogen-fueled vessels. The implementation of the proposed approach makes it possible to take into account the influence of changing external conditions when assessing the prospects for the development of the "hydrogen direction" in shipbuilding. The transition to hydrogen fuel is in good agreement with the Climate Doctrine of the Russian Federation and international strategies to reduce greenhouse gas emissions.

Key words: sustainable development, environmental assessment, greenhouse gases, ship, ship power plant, alternative fuels, hydrogen, hierarchy analysis method, system approach.

Financial Support: the work was carried out as part of the execution of the state task of the IPT RAS № 075-01352-23-0 for 2023 and for the planned period of 2024 and 2025 at the expense of the subsidy provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement on the provision of subsidies from the federal budget for financial support for the implementation of the state task dated 13 January 2023 № 075-03-2023-431)

For citation: Lyudmila A. Koroleva, Igor G. Malygin Application of a systematic approach for a balanced environmental assessment of hydrogen-fueled vessels // Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 189—196. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.023

Введение

Устойчивое развитие рассматривается в настоящее время как одно из основных направлений решения современных проблем. Его ключевыми факторами являются энергетическая безопасность, снижение загрязнения окружающей среды (ОС), предотвращение изменений климата. Климатические изменения принято связывать с совокупным выбросом парниковых паров и газов (ПГ), образующихся в результате производственной деятельности человека. Рост выбросов ПГ требует поиска более устойчивых путей производства и потребления энергии.

Водный транспорт играет важную роль в экономическом развитии страны, однако он оказывает значительное негативное влияние на ОС. Например, общий объем выбросов морского сектора находится на уровне 900 млн тонн CO₂ в год [1-3]. Суммарно на долю водного транспорта приходится до 5,3 % общих выбросов в ОС [4].

Международная морская организация, ИМО (The International Maritime Organization, IMO) разработала дорожную карту по сокращению выбросов, в рамках действия которой планируется уменьшение количества ПГ в результате международного морского судоходства не менее чем на 50% к 2050 году, углекислого газа (CO₂) - не менее, чем на 40% и 70% к 2030 и 2050 годам соответственно по сравнению с уровнями 2008 года [4,5]. Аналогичную стратегию по сокращению выбросов ПГ в морском секторе одобрил Европейский союз [6].

Учитывая, что объемы выбросов ПГ водного транспорта в значительной степени зависят от количества потребленного углеводородного топлива, поиск путей и разработка технологий, внедрение которых позволяет эффективно применять альтернативные источники энергии и снижать потребление ископаемых видов топлива, являются актуальными.

Тенденция на ужесточение экологических норм в судоходстве в перспективе ведет к более массовому использованию низко- и безуглеродных видов топлива, росту инвестиций в разработку и применение инновационных транспортных средств.

Выполнение требований ИМО при проектировании и эксплуатации судов приводит к отказу от традиционно применяемого дизельного топлива и мазута, содержащих до 3,5% серы и необходимости использовать альтернативные виды топлива и электрическую энергию [1-4,7,8]. Применение традиционных ископаемых сортов топлива для судовых энергетических установок (СЭУ), согласно стратегии ИМО, не является перспективным направлением развития современного флота. Проведенные исследования [8-11], показывают, что достижение целей ИМО

возможно, но требует альтернативных решений, среди которых важная роль отведена водороду как экологически чистому энергоносителю.

Развитие водородной энергетики, увеличение производства и расширение сферы применения H₂ позволяют говорить о перспективности его использования в качестве судового топлива [2, 12]. Переход СЭУ на водородное топливо является приоритетной мерой, направленной на «повышение энергетической эффективности» и «развитие альтернативных источников энергии с низким уровнем выбросов ПГ», закрепленной в Климатической доктрине Российской Федерации (РФ) [13]. Однако только системный подход и сбалансированность действий при разработке и внедрении водородной энергетики будут соответствовать достижению устойчивого развития, которое рассматривается как основополагающий принцип Климатической доктрины [13].

Целью работы является применение системного подхода метода анализа иерархий (МАИ) для сбалансированной экологической оценки судов на водородном топливе.

Водород как источник энергии

Водород является самым распространенным элементом, доля его атомов в природе составляет приблизительно 88,6%. Однако, в отличие от ископаемого топлива, газообразный H₂ не извлекается из недр земли непосредственно, необходимо его производство из различных источников сырья [12,14]. Наиболее экологически чистым и дорогим способом - электролизом воды - получают около 4% водорода (см. рис. 1). При этом для полного исключения выбросов CO₂, энергия для электролиза должна быть получена из возобновляемых «безуглеродных» источников.



Рис. 1 Структура производства водорода

Определены достоинства и недостатки водородного топлива при его использовании в СЭУ (см. рис. 2).



Рис. 2. Достоинства и недостатки использования водородного топлива в СЭУ

Одним из примеров успешной реализации водородной СЭУ является французский катамаран Energy Observer, H₂ на котором получают путем электролиза очищенной морской воды. Преобразование химической энергии водорода в электрическую и тепловую производится при работе топливных элементов (см. рис. 3). Проект имеет существенные преимущества, связанные с возможностью сокращения энергопотребления морского транспорта и реализацией стратегии «нулевых» выбросов ПГ [15]. Однако на сегодняшний день дальнейшей реализации на торговом флоте рассматриваемая концепция пока не получила, что, на наш взгляд, определяется экономическими причинами и отсутствием инфраструктуры.

Успешное испытание первого в РФ прототипа судна на водороде в октябре 2023 года провела в акватории Невы компания Sitronics group [16].

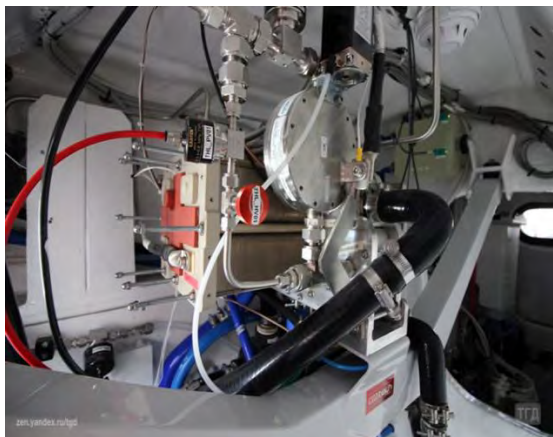


Рис. 3. Установка по производству и переработке водорода, установленная на катамаране Energy Observer

Широкому распространению водородной энергетики препятствует наличие технических, стоимостных и институциональных проблем [12]. Применение «водородного направления» развития СЭУ требует дополнительной оценки, учитывающей весь комплекс сложившихся условий.

Экологическая оценка перспектив применения водородного топлива на судах с использованием МАИ

Перспективным инструментом для оценки перспектив развития водного транспорта, математическим инструментом системного подхода к решению сложных проблем принятия решений, является МАИ, разработанный Т. Саати [17]. Метод успешно применен в исследованиях, связанных с распределением ресурсов, разработкой сложных пожарно-технических систем [18], повышением экологической эффективности локомотивной тяги [19], что определяется его существенными преимуществами (см. рис. 4). Использование МАИ позволяет применить системный подход к решению сложных проблем, учитывать широкий спектр формализуемых и неформализуемых экологических, экономических, социальных, технологических факторов, не связанных между собой аналитическими зависимостями и принимать обоснованные решения.

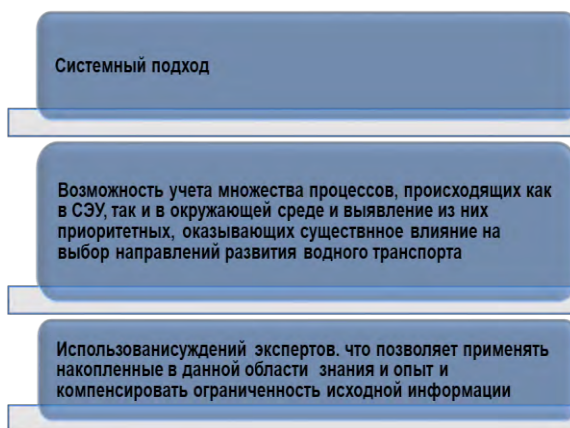


Рис. 4. Преимущества применения МАИ для экологической оценки судов

Авторами предложена система критериев для сбалансированной экологической оценки судов, работающих на различных источниках энергии, включая водородное топливо (см. рис. 5). При формировании системы учтено, что проблемы снижения загрязнения ОС необходимо рассматривать в комплексе с энергетическими, экономическими, технологическими проблемами и вопросами обеспечения безопасности.

Энергетическая эффективность ЭЭ	• Характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта. Характеризуется коэффициентом полезного действия, коэффициентом использования мощности, коэффициентом энергетической эффективности (введен ИМО).
Углеродная нейтральность УН	• Выбросы CO ₂ и других парниковых газов при эксплуатации судна, получении топливно-энергетических ресурсов
Пожаровзрывобезопасность ПБ	• Состояние судна, характеризующееся возможностью предотвращения возникновения и развития пожара и взрыва, а также воздействия на людей и имущество их опасных факторов пожара (взрыва)
Физическое воздействие ФВ	• Воздействие шума и вибрации на ОС и человека
Безопасность человека БЧ	• Безопасность человека при авариях и чрезвычайных ситуациях, охрана труда
Экономические затраты ЭЗ	• Затраты на техническое обслуживание и ремонт судов и СЭУ, на энергоресурсы, текущее содержание бункеровщиков и т.д.
Конструкционные особенности и инфраструктура КО	• Необходимость обновления и строительства инфраструктуры, внедрения инновационных технологий и оборудования для получения топлива и заправки судов, масса силовых установок, накопителей энергии
Отходы эксплуатации ОЭ	• Образование отходов эксплуатации (утечки топлива, льяльные воды, нефтешлам, аккумуляторные батареи, отходы, связанные с грузом и т.д.), наличие технологий утилизации, их доступность

Рис. 5. Критерии для сравнительной экологической оценки судов, использующих различные источники энергии

При принятии решений МАИ не предоставляет «единственного правильного» решения. Применение метода позволяет в интерактивном режиме найти альтернативу, которая лучше всего согласуется с пониманием пользователем проблемы и путей её решения.

На первом (высшем) уровне находится главная цель – судно (см. рис. 6). Второй уровень формируют уточняющие цель критерии, характеристика которых представлена выше (см. рис. 5). Третий (нижний) уровень образуют типы СЭУ, различающиеся по виду применяемого источника энергии. Необходимо провести оценку СЭУ по отношению к критериям второго уровня.

Особенности принятия решений при использовании МАИ:

- принимаются к рассмотрению несколько альтернативных вариантов решения;
- устанавливается критерий оптимальности для каждого варианта решения;
- задаются конкретные условия решения проблемы;
- определяются причины, влияющие на выбор решения.

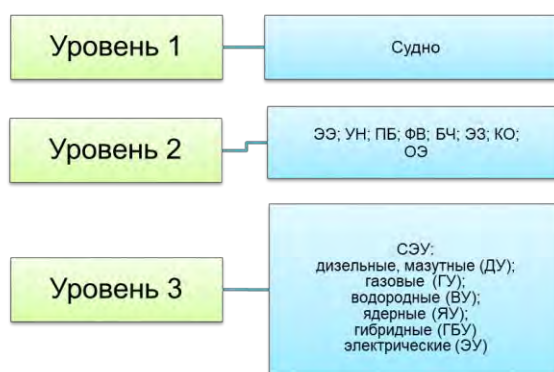


Рис. 6. Декомпозиция задачи анализа экологической опасности судов в иерархию

Определена последовательность действий по реализации МАИ для решения задачи оценки экологической опасности судов (см. рис. 7). Для проведения субъективных парных сравнений использовалась индексная шкала от 1/9 до 9 [17].



Рис. 7. Последовательность действий по реализации МАИ для решения задачи экологической оценки судов

Отбор экспертов проводился из числа наиболее опытных сотрудников, занимающиеся эксплуатацией судов, разработкой новых транспортных средств, экологов, научно-педагогических работников профильных ВУЗов. Каждый из 20 опрошенных специалистов заполнил 9 МПС (одну – первого уровня и восемь – третьего уровня), примеры которых представлены в табл. 1,2.

Значение веса фактора V_i , наибольшее собственное значение матрицы суждений $\lambda_{\max}$, индекс согласованности (ИС) и отношение согласованности (ОС) определяли по методике, предложенной в [17]. Результаты считаются согласованными при $ОС < 0,1$. В противном случае необходимо проверить суждения эксперта.

Таблица 1

Пример заполнения МПС для второго уровня (оценка весов критериев)

	ЭЭ	УН	ПБ	ФВ	БЧ	ЭЗ	КО	ОЭ	V_i
ЭЭ	1	3	1/3	1/3	1/5	3	1/3	1/3	0,06
УН	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	0,03 3
ПБ	3	3	1	3	1	5	3	5	0,25
ФВ	3	3	1/3	1	1/3	3	3	5	0,16
БЧ	5	5	1	3	1	5	3	5	0,29
ЭЗ	1/3	3	1/5	1/3	1/5	1	3	3	0,07
КО	3	3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3	0,08
ОЭ	3	3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1	0,05

$\lambda_{\max} = 8,947$; ИС=0,135; ОС=0,096<0,1

Таблица 2

Пример заполнения МПС для третьего уровня по критерию «Углеродная нейтральность»

	ДУ	ГУ	ВУ	ГБУ	ЯУ	ЭУ	V_i
Дизельная (ДУ)	1	1/3	1/7	1/2	1/8	1/9	0,03
Газовая (СПГ) (ГУ)	3	1	1/4	2	1/4	1/5	0,07
Водородная (ВУ)	7	4	1	6	1	1	0,27
Гибридная (ГБУ)	2	1/2	1/6	1	1/7	1/6	0,04
Ядерная (ЯУ)	8	4	1	7	1	1	0,28
Электрическая (ЭУ)	9	5	1	7	1	1	0,30

$\lambda_{\max} = 6,039$; ИС=0,008; ОС=0,006<0,1

Применение МАИ позволило выявить глобальные приоритеты и определить рейтинг судов (см. рис. 8).

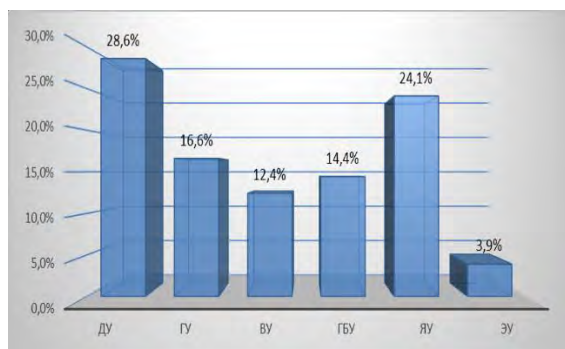


Рис. 8. Результаты определения рейтинга судов, использующих СЭУ, работающие на различных источниках энергии

Глобальные приоритеты распределились следующим образом.

Наибольшим рейтингом обладают суда, использующие дизельное и мазутное топливо, что связано с их широким применением в настоящее время. Применение ядерного топлива также высоко оценивается экспертами, на что оказывает влияние политика РФ по развитию Арктического региона, где широко используются атомоходы.

Сжиженный природный газ является перспективным видом топлива и занимает третье место, обладая преимуществами по отношению к дизельному и мазутному топливу по энергетическим свойствам, экономической и экологической эффективности.

На четвертое место эксперты поставили суда с гибридными СЭУ, которые имеют большой потенциал для внедрения при проектировании, эксплуатации и модернизации. Это определяется их высокой энергетической эффективностью, экономичностью, возможностью соблюдения норм экологической безопасности, определенных, например, стратегией ИМО.

Водный транспорт на водородном топливе занимает пятое, предпоследнее место, что, на наш взгляд, можно объяснить отсутствием инфраструктуры, пожаровзрывоопасностью газа, нерешенностью вопросов, связанных с его производством экологически чистым способом и высокими экономическими затратами на реализацию. Преодоление рассмотренных проблем

значительно повысит рейтинг водородного топлива, однако потребует значительных материальных инвестиций. На сегодняшний день «зеленый» водород является очень дорогим видом топлива.

Электродвижение было поставлено экспертами на последнее место, так как практически не имеется опыта применения такого транспорта, не решены вопросы перевозок на дальние расстояния и проблемы утилизации, например, аккумуляторных батарей (посмотрим на опыт применения электрических судов в Москве).

Заключение

В работе обоснованы преимущества МАИ и предложена система экологической оценки судов, работающих на различных источниках энергии. Обоснованы критерии оценки, выявлено их влияние и приоритет. При формировании системы критериев учтено, что экологические проблемы нельзя рассматривать отдельно от экономических, энергетических, технологических проблем и вопросов обеспечения безопасности.

Отмечено, что применение МАИ позволяет оценить перспективы развития водного транспорта в зависимости от существующих внешних условий, изменение которых может способствовать перераспределению глобальных приоритетов и смещению акцентов развития судостроения.

Необходимость разработки и внедрения СЭУ, работающих на альтернативных источниках энергии, определяется целями сокращения выбросов ПГ и удовлетворения международных и национальных экологических требований. Переход на водородное топливо хорошо согласуется с Климатической доктриной Российской Федерации и международными стратегиями по сокращению выбросов ПГ.

Применение водородного топлива, с одной стороны, обеспечит возможность достижения заявленных экологических целей, с другой стороны, на сегодняшний день имеет ряд существенных ограничений, связанных с нерешенностью вопросов обеспечения безопасности, получения водорода и отсутствием инфраструктуры.

Дальнейшие исследования предполагается направить на иерархическую декомпозицию и детализацию каждого критерия.

Литература

1. Галай А.Г. Роль и значение внутреннего водного транспорта России в транспортной логистике // Научные проблемы водного транспорта. – 2015. – №42. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-i-znachenie-vnutrennego-vodnogo-transporta-rossii-v-transportnoy-logistike> (дата обращения: 24.10.2023).
2. Dotto A., Satta F., Campora U. Energy, environmental and economic investigations of cruise ships powered by alternative fuels // Energy Conversion and Management – 2023 – Vol. 285 –P. 117011.
3. Maritime Organization (IMO) official website [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhousegas-emissions-from-ships.aspx> (дата обращения: 24.08.2023).
4. Хорошев В.И., Попов Л.Н., Гатин Р.И. Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – №4 (390). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-alternativnyh-vidov-topliva-v-sudovyh-energeticheskikh-ustanovkakh> (дата обращения: 24.08.2023).
5. Alkhaledi A., Sampath S., Pilidis P. Propulsion of a hydrogen-fuelled LH2 tanker ship // International journal of hydrogen energy – 2022 – Vol.47 –p.p. 17407 – 14722.
6. European commission, 2022. Reducing emissions from the shipping sector [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_it (дата обращения 01.03.2023)

7. Зайцев В.Р., Рослякова О.В., Бочкарева И.И., Кирилук А.И. Экологические проблемы на водном транспорте и методы их решения // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – №2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-na-vodnom-transporte-i-metody-ih-resheniya> (дата обращения: 24.10.2023).
8. Живлюк Г.Е., Петров А.П. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2021. – №5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-tehnologii-vodnogo-transporta-dlya-ogranicheniya-parnikovogo-effekta> (дата обращения: 04.10.2023).
9. Lindstad E., Torstein I. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements // Transportation Research: Part D: Transport and Environment – 2018. – Vol. 63 – P.276–290.
10. Латухов С.В. Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 160 с.
11. Trozzi C. Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation / 9-th International Emissions Inventory Conference. – 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf> (режим доступа 01.09.2023)
12. Ивахнюк С.Г., Королева Л.А. Научно-технические инновации по снижению концентрации техногенного CO₂ в атмосфере за счет повышения его абсорбции // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 2 (62) – С.69-79.
13. Климатическая доктрина Российской Федерации: утв. Приказом Президента РФ № 812 от 26.10. 2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://storage.consultant.ru/site20/202310/27/ukaz_271023_812.pdf (дата обращения 26.10. 2023).
14. Шафиев Д.Р., Трапезников А.Н., Хохонов А.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Субчева Е.Н. Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – №12 (235). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-polucheniya-vodoroda-v-promyshlennom-masshtabe-sravnitelnyy-analiz> (дата обращения: 26.10.2023).
15. Судовая энергоустановка на водороде. Как работает транспорт будущего [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XQoctfcyVQCxVRfl> (дата обращения 26.09. 2023).
16. В России успешно испытали первое водородное судно [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ixbt.com/news/2023/10/09/v-rossii-uspeshno-ispytali-pervoe-vodorodnoe-sudno.html> (дата обращения 06.09. 2023).
17. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. Вачнадзе Р.Г. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
18. Малыгин И.Г. Методы принятия решений при разработке сложных пожарно-технических систем. - СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2007. - 288 с.
19. Королева Л.А., Малыгин И.Г. Использование метода анализа иерархий для экологической оценки локомотивной тяги на водородных топливных элементах // Транспорт: наука, техника, управление – 2023. – №7. – С. 18-26..

References

1. Galay A.G. Rol' i znachenie vnutrennego vodnogo transporta Rossii v transportnoy logistike [The role and importance of inland water transport] // Nauchn-yye problemy vodnogo transporta. – 2015. – №42. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-i-znachenie-vnutrennego-vodnogo-transporta-rossii-v-transportnoy-logistike> (data obrashcheniya: 24.10.2023).
2. Dotto A., Satta F., Campora U. Energy, environmental and economic investigations of cruise ships powered by alternative fuels // Energy Conversion and Management – 2023 – Vol. 285 –P. 117011
3. Maritime Organization (IMO) official website [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhousegas-emissions-from-ships.aspx> (дата обращения: 24.08.2023).
4. Khoroshev V.I., Popov L.N., Gatin R.I. Perspektivy ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh [Prospects for the use of alternative fuels in marine power plants]// Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. – 2019. – №4 (390). [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-alternativnykh-vidov-topliva-v-sudovykh-energeticheskikh-ustanovkakh> (data obrashcheniya: 24.08.2023).
5. Alkhaledi A., Sampath S., Pilidis P. Propulsion of a hydrogen-fuelled LH2 tanker ship // International journal of hydrogen energy – 2022 – Vol.47 –p.p. 17407 – 14722
6. European commission, 2022. Reducing emissions from the shipping sector [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_it (дата обращения 01.03.2023)
7. Zaytsev V.R., Roslyakova O.V., Bochkareva I.I., Kirilyuk A.I. Ekologicheskiye problemy na vodnom transporte i metody ikh resheniya [Environmental problems in water transport and methods of their solution] // Inter-ekspo Geo-Sibir'. – 2021. – №2. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-na-vodnom-transporte-i-metody-ih-resheniya> (data obrashcheniya: 24.10.2023).
8. Zhivlyuk G.E., Petrov A.P. Perspektivn-yye tekhnologii vodnogo transporta dlya ogranicheniya parnikovogo effekta [Promising water transport technologies to limit the greenhouse effect] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. –2021. –№5. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-tehnologii-vodnogo-transporta-dlya-ogranicheniya-parnikovogo-effekta> (data obrashcheniya: 04.10.2023).
9. Lindstad E., Torstein I. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements // Transportation Research: Part D: Transport and Environment – 2018. – Vol. 63 – P.276–290.
 10. Latukhov S.V. Problemy ekologicheskoy bezopasnosti sudokhodstva: monografiya [Problems of environmental safety of shipping] / S. V.Latukhov [i dr.]. – SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. — 160 s.
 11. Trozzi C. Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation / 9th International Emissions Inventory Conference. – 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf> (режим доступа 01.09.2023)
 12. Ivakhnyuk S.G., Koroleva L.A. Nauchno-tehnicheskiye innovatsii po snizheniyu kontsentratsii tekhnogenogo SO₂ v atmosfere za schet povysheniya yego absorptsii Scientific and technical innovations to reduce the concentration of technogenic CO₂ in the atmosphere by increasing its absorption] // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. – 2022. – № 2 (62) – S.69-79.
 13. Klimaticheskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii [Climate Doctrine of the Russian Federation]: utv. Prikazom Prezidenta RF № 812 ot 26.10.2023 [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: https://storage.consultant.ru/site20/202310/27/ukaz_271023_812.pdf (data obrashcheniya 26.10. 2023)
 14. Shafiyev D.R., Trapeznikov A.N., Khokhonov A.A., Agarkov D.A., Bredikhin S.I., Chichirov A.A., Subcheva YE.N. Metody polucheniya vodoroda v promyshlennom masshtabe. Sravnitel'nyy analiz Methods for producing hydrogen on an industrial scale. Comparative analysis [Methods for producing hydrogen on an industrial scale. Comparative analysis] // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. – 2020. – №12 (235). [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-polucheniya-vodoroda-v-promyshlennom-masshtabe-sravnitelnyy-analiz> (data obrashcheniya: 26.10.2023).
 15. Sudovaya energoustanovka na vodorode. Kak rabotayet transport budushchego [15. Ship's hydrogen-powered power plant. How the transport of the future works] [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://dzen.ru/a/XQoctfcyvcQCxVRfl> (data obrashcheniya: 26.9.2023).
 16. V Rossii uspešno ispytali pervoye vodorodnoye sudno [The first hydrogen vessel has been successfully tested in Russia] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.ixbt.com/news/2023/10/09/v-rossii-uspešno-ispytali-pervoye-vodorodnoye-sudno.html> (data obrashcheniya: 06.10.2023).
 17. Saati T., Kerns K. Analiticheskoye planirovaniye. Organizatsiya system [The first hydrogen Analytical planning was successfully tested in Russia. Organization of ship systems]: per. s angl. Vachnadze R.G. – M.: Radio i svyaz', 1991 – 224 s.
 18. Malygin I.G. Metody prinyatiya resheniy pri razrabotke slozhnykh požarno-tehnicheskikh sistem [Decision-making methods in the development of complex fire-technical systems]. - SPb.: SPBU GPS MCHS Rossii, 2007. - 288 s.
 19. Koroleva L.A., Malygin I.G. Ispol'zovaniye metoda analiza iyerarkhiy dlya ekologicheskoy otsenki lokomotivnoy tyagi na vodorodnykh toplivnykh elementakh [Using the hierarchy analysis method for environmental assessment of locomotive traction on hydrogen fuel cells] // Transport: nauka, tekhnika, upravleniye –2023. – №7. – S. 18-26.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Королева Людмила Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект 149. Тел. +7(952) 249-63-53, e-mail: lyudamil@mail.ru

Lyudmila A. Koroleva, Dr.Sci. (Eng), assistant professor, professor of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Automotive Industry, Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia, Moskovsky Prospekt, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation. Tel. +7(952) 249-63-53, e-mail: lyudamil@mail.ru

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13., Тел. +7(812) 323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-th Line VO, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation., Tel. +7(812)323-29-54, e-mail: malygin_com@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 31.10.2023.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 07.11.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 09.11.2023.

Научная статья

УДК: 629.564.3/629.58

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.024>**Совершенствование стабилизации движения судна при качке забортного оборудования**Лютикова М.Н.¹ mnlyutikova@mail.ru, Бузенков И.И.¹ igor.buzenkov@mail.ru,
Халеева Е.П.¹ bakay_e_p@mail.ru,¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Современные универсальные многоцелевые буксируемые комплексы находятся в стадии непрерывного совершенствования. В статье предлагается комплексное исследование эксплуатационно-технических показателей универсальных буксируемых комплексов, длины кабель-троса, сил сопротивления носителя нейтральной плавучести, кабеля-связи. В исследовании рассматривалось движение универсального многоцелевого буксируемого комплекса при качке, основанное на методе приближенном решении уравнений движения нити в вязкой среде. Получены результаты вычислений начального натяжения в кабеле связи и длины троса, при которых вертикальные колебания практически полностью гасятся по длине кабеля связи. Нечёткая модель управления универсального буксируемого комплекса разработана по параметрам эксплуатационно - технических показателей полученных результатов вычислений. Определены лингвистические переменные с именами «длина троса», «сила», «амплитуда колебаний забортной системы» по которым разработана нечеткая модель управления универсального многоцелевого буксируемого комплекса. В свою очередь данная модель служит для повышения качества эксплуатационно-технических характеристик стабилизации движения судна при качке забортного оборудования.

Ключевые слова: Универсальный многоцелевой буксируемый комплекс, носитель нейтральной плавучести, кабель-троса, гараж-заглубитель, кабель-связи, нечеткая модель, уравнение движения нити в вязкой среде.

Для цитирования: Лютикова М.Н., Бузенков И.И., Халеева Е.П. Совершенствование стабилизации движения судна при качке забортного оборудования, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 197—204. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.024

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.024>**Improving the stabilization of the movement of the vessel during the pitching of outboard equipment**Marina N. Lyutikova¹ mnlyutikova@mail.ru, Igor I. Buzenkov¹ igor.buzenkov@mail.ru,
Elena P. Khaleeva¹ bakay_e_p@mail.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. Modern universal multi-purpose towed complexes are in the process of continuous improvement. The article proposes a comprehensive study of the operational and technical indicators of universal towed complexes, the length of the cable-cable, the forces of resistance of the carrier of neutral buoyancy, cable-communication. The study looked at the motion of a universal multipurpose towed complex in pitching, based on the method of approximate solving the equations of motion of a filament in a viscous medium. The results of calculations of the initial tension in the communication cable and the length of the cable are obtained, at which the vertical vibrations are almost completely extinguished along the length of the communication cable. The fuzzy control model of the universal towed complex was developed according to the parameters of the operational and technical indicators of the obtained calculation results. Linguistic variables are defined with the names "cable length", "force", "amplitude of vibrations of the outboard system" by which a fuzzy control model has been developed. In turn, this model is used to improve the operational and technical characteristics of stabilizing the movement of the vessel when rolling outboard equipment.

Keywords: Universal multi-purpose towed complex, neutral buoyancy carrier, cable-rope, Garage-Deepener, cable-communications, fuzzy model, equation of filament motion in viscous medium.

For citation: Marina N. Lyutikova, Igor I. Buzenkov, Elena P. Khaleeva, Improving the stabilization of the movement of the vessel during the pitching of outboard equipment, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 197—204. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.024

Введение

Развитие морской техники разведки и добычи нефти является отражением уровня технологий и интеллектуальных возможностей страны. Совершенствование морской техники требует системного подхода, который включает в себя анализ задач для повышения эффективности

функционирования эксплуатационно-технических характеристик морских технологических комплексов.

Анализ исследуемой литературы [1-14] позволяет определить требования, которым должны удовлетворять новая морская техника, и выявить потенциальные проблемы, которые могут возникнуть при ее эксплуатации. Системный анализ определяет исследование прямого назначения техники в применении анализа альтернатив, например,

придание совершенных гидродинамических форм по требованиям назначения в морской среде, а также характеристики удельной мощности или технической производительности по показателям назначения.

Применение универсальных многоцелевых буксируемых комплексов (УМБК) позволяет существенно расширить возможности геофизических судов в освоении мирового океана. Использование буксируемой техники для исследования донной поверхности в интересах геофизических исследований, требует обеспечения энергетики подводных комплексов, в частности маневрирования по глубине и направлению хода УМБК. Совокупность проблематики включает большой комплекс технических задач необходимость обеспечения энергоснабжения размещенной на носителе аппаратуры и в то же время поддержание информационного обмена данными и сигналами управления комплексом.

Технологии применения УМБК имеет свои особенности связанные с оценкой зондирования донной поверхности, например перспективная, съёмка донной поверхности под некоторым углом оказывается более информативная с точки зрения анализа результатов исследований. Буксировка УМБК даёт при существующей технологии движения геофизических судов вдоль линии заданного профиля хорошие результаты комплексного изучения океана.

Однако, использование УМБК также может столкнуться с определенными проблемами, связанными с техническими ограничениями буксируемой техники, сложностью управления и координации действий различных компонентов комплекса, а также необходимостью обеспечения безопасности при работе в морской среде [1-2; 4].

Целью данного исследования является повышение эксплуатационно-технических характеристик стабилизации движения судна при качке забортного оборудования на приближенном решении уравнений движения нити в вязкой среде, сопротивление которой пропорционально квадрату скорости. Повышение статической и динамической устойчивости УМБК на основе нечеткой модели.

УМБК должна обладать свойствами маневрирования и обеспечивать. В рабочем режиме работы подводная часть (ПЧ) УМБК представляет собой двухзвенную систему. Тяжелый гараж-заглубитель (ГЗ) прикреплен к буксирному кабелю-тросу КТ и в свою очередь буксирует за собой на кабеле связи (КС) (вытравленной длиной от 50 до 100 м) носитель нейтральной плавучести (ННП). Таким образом, свойства маневрирования необходимо придать системе ГЗ-ННП [3].

Контроль положения ГЗ в толще воды и относительно дна осуществляется по показаниям датчика давления и эхолота с точностью, заданной техническими характеристиками используемых приборов.

Управление глубиной хода ПЧ УМБК возможно только изменением длины КТ за счет работы судовой лебедки СПУ или за счет изменения скорости движения судна. Эти способы являются основными, хотя не позволяют достаточно оперативно менять глубину буксировки ПЧ УМБК.

При скорости буксировки в пределах от 1 до 3 уз (от 0,5 до 1,5 м/с) амплитуда вертикальных

перемещений кормы СН может достигать 2 м при периоде колебаний от 5 до 10 с.

Колебания кормы передаются по КТ и оказывают воздействие на ПЧ УМБК. Это воздействие можно представить как переменную по величине и направлению реакцию КТ. Влияние качки особенно актуально для ННП, на котором размещается аппаратура, чувствительная к угловым перемещениям ННП [2-3].

Для устранения влияния качки КН на ННП используем пассивный метод – излом буксирной линии за счет использования ГЗ. Буксировка ННП осуществляется за ГЗ на КС, что обеспечивает практически прямой угол между ветвями буксирной линии. Можно считать, что в этом случае ГЗ совершает вертикальные колебания, амплитуда которых практически равна амплитуде перемещений кормы судна-буксировщика [7].

Таким образом, коренной конец троса-поводка ННП будет совершать вертикальные колебания, которые распространяются далее по тросу и гасятся вследствие сопротивления среды. Выбор длины КС для связки ГЗ-ННП и параметров ННП позволяют уменьшить воздействие качки СН до приемлемого уровня.

Уравнение равновесия троса в потоке будут иметь вид [8-9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial s} = G \sin A \\ T \frac{dA}{ds} = G \cos A - q_{H0} |\sin A| \sin A \\ \frac{\partial x}{\partial s} = \cos A \\ \frac{\partial y}{\partial s} = \sin A \end{cases} \quad (1)$$

где S – длина дуги, отсчитываемая от ходового конца, задающая положение точки на буксирной линии, точка $S=0$ соответствует точке крепления буксируемого тела, натяжение и угол наклона троса в этой точке известны и вычисляются как:

$$T_0 = [(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2]^{1/2}; \quad (2)$$

$$A_0 = -\arctg (\sum Y_i / \sum X_i), \quad (3)$$

где X_i – сумма проекций всех сил, действующих на буксируемое тело на ось x , направление которой совпадает с вектором скорости буксируемого тела; Y_i – сумма проекций всех сил, действующих на тело, на ось y .

Точка $S=L$ соответствует корневому концу троса, в котором необходимо определить натяжение и его положение относительно ходового конца.

T – натяжение в данной точке троса;

G – погонный вес троса в воде;

A – угол наклона троса;

x, y – декартовы координаты точки троса; точке $S=0$ соответствует $x=0, y=0$.

Предполагается что для буксировки ННП используется кабель-трос диаметром 19 мм.

Для определения необходимой длины КС и величины силы сопротивления ННП предлагается следующий метод, основанный на приближенном решении уравнений движения нити в вязкой среде, сопротивление которой пропорционально квадрату скорости.

Предполагается, что нерастяжимая, невесомая нить располагается горизонтально и в равновесном положении $x(S, t) = 0$, $y(S, t) = 0$, натяжение по длине нити постоянно и равно T_0 (что справедливо для троса нейтральной плавучести).

В предположении, что $\left(\frac{\partial y}{\partial S}\right)^2 \ll 1$, т. е. в отклонениях от равновесного состояния форма нити полая, следует, что $x(t) \equiv 0$ и движение нити описывается уравнением [8]:

$$T_0 = \frac{\partial^2 y}{\partial S^2} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{1}{2} C_H \rho d \left| \frac{\partial y}{\partial t} \right| \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

где m – погонная масса троса с учетом присоединенной массы воды кг/м; ρ – плотность воды, кг/м³; d – диаметр троса, м; C_H, C_K – безразмерные коэффициенты нормальной и касательной силы. Для тросов круглого сечения при числах Re от 10^3 до $5 \cdot 10^5$ коэффициент C_H лежит в пределах от 1,1 до 1,4, отношение C_K/C_H составляет от 0,01 до 0,05, поэтому при расчете допустимо не учитывать касательную составляющую гидродинамической силы;

Предполагается, что коренной конец троса ($S=0$) совершает колебания [11-14]:

$$y(0, t) = A e^{-i\omega t} \quad (5)$$

Трос предполагается полубесконечным, что физически означает, что с некоторого значения L , при $S > L$

$$y(S, t) \approx 0 \quad (6)$$

где S – длина дуги, отсчитываемая от ходового конца, задающая положение точки на буксирной линии, точка $S = 0$ соответствует точке крепления буксируемого тела.

Вследствие того, что амплитуда вынужденных колебаний точек троса будет ограниченной, можно рассматривать величину $\left| \frac{\partial y}{\partial t} \right|$ как постоянную для некоторого участка троса, обозначим ее $\tilde{V}_y$.

Тогда для ограниченного участка троса уравнение вынужденного гармонического движения можно представить:

$$T_0 = \frac{d^2 A}{dS^2} + \omega^2 m A - i \omega \frac{1}{2} C_H \rho d \tilde{V}_y = 0 \quad (7)$$

где ρ – плотность жидкости; d – диаметр троса; A – угол атаки, который соответствует изменению позиции УМБК при изменении вектора скорости, граничные условия соответствуют условиям, которые определяются статической устойчивостью и начальной компоновкой УМБК:

$$A(0) = A_0 \quad (8)$$

и условие гашения колебаний:

$$\frac{d|A|}{dS} < 0 \quad (9)$$

Общее решение уравнения вынужденного гармонического движения можно представить в виде:

$$A = c_1 e^{\lambda_1 S} + c_2 e^{\lambda_2 S} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = R(\cos \varphi + i \sin \varphi) \\ \lambda_2 = R(-\cos \varphi - i \sin \varphi) \\ \varphi = \frac{1}{2} \left[\arctg \left(-\frac{C_H \rho d \tilde{V}_y}{2m\omega} \right) + 2\pi \right], \varphi \in \left[\frac{\pi}{2}; \pi \right] \\ R = \left\{ \left[\left(\frac{1}{2} C_H \rho d \tilde{V}_y \omega \right)^2 + (m\omega^2)^2 \right]^{1/2} / T_0 \right\}^{1/2} \end{cases} \quad (11)$$

Условие (9) выполняется, если в (10) положить $c_2 = 0$. С учетом граничного условия (8) решение уравнения (7) будет иметь вид:

$$A = A_0 e^{\lambda_1 S} \quad (12)$$

Подставляя значение λ_1 из (11), можем получить:

$$|A| = |A_0| e^{(R \cos \varphi) S} \quad (13)$$

Предположим, что на рассматриваемом участке амплитуда колебаний точек троса уменьшается в n раз, обозначим длину этого участка l_n , т. е.

$$e^{(R \cos \varphi) l_n} = \frac{1}{n} \quad (14)$$

Если в качестве среднего значения скорости на рассматриваемом участке принять:

$$\tilde{V}_y = \frac{\int_0^{l_n} |A(S)| \omega dS}{l_n} \quad (15)$$

то с учетом (14), (15)

$$\tilde{V}_y = \frac{A_0 \omega}{\ln \left(\frac{1}{n} \right)} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \quad (16)$$

Подставляя найденное таким образом значение $\tilde{V}_y$ в (11), определяем R и $\cos \varphi$ из (14) находим:

$$l_n = -\frac{\ln \left(\frac{1}{n} \right)}{R \cos \varphi} \quad (17)$$

Для КС диаметром не более 19 мм был произведен расчет длины l_2 , начальные амплитуды принимались $A_0 = 2^{-k}$, $k=0, 1, 2, 3, 4, 5$, что позволяет при амплитуде вертикальных колебаний коренного конца троса равной 2 м оценить расстояние, на котором амплитуда гасится в 2^5 раз.

При этом погонная масса КС вместе с присоединенной массой воды принималась равной 0,47 кг/м, коэффициент сопротивления был принят равным 1,2. Расчет произведен для частот колебаний $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$.

Для оценки сходимости метода были вычислены величины l_4 при $A_0 = 2 \text{ м}$ – результат также приводится в таблицах. Разница между суммой $l_2(A_0 = 2) + l_2(A_0 = 1)$ и l_4 не превосходит 4%, т.е. предлагаемый способ оценки имеет хорошую сходимость. В таблицах также приведены оценки амплитуды горизонтальных перемещений x_2 точек, соответствующих длинам l_2 . Оценка производилась по формуле:

$$x_2 = \left[\left(\frac{A_0}{2} \right)^2 + l_2^2 \right]^{\frac{1}{2}} - l_2 \quad (18)$$

$$\Delta \alpha_2 = \frac{A_0}{2l_2} \quad (19)$$

Результаты

Там же приведены оценки амплитуды изменения угла наклона троса на расстоянии l_2 от коренного конца:

Величина натяжения КС была принята равной сопротивлению ННП при скоростях буксировки от 1 до 3 уз (от 0,5 до 1,5 м/с). Результаты вычислений приведены в таблицах 1 – 5.

Таблица 1

Результаты вычислений длины l_2 при $T_0=68,75$ Н

Амплитуда гармонических колебаний A_0 , м	Частота колебаний $\omega=1$ рад/с			Частота колебаний $\omega=0,5$ рад/с		
	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta \alpha_2$, рад	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta \alpha_2$, рад (градус)
2	1,93	0,24	0,52	3,85	0,13	0,26
1	2,69	0,05	0,19	5,38	0,02	0,09
0,5	3,70	0,01	0,07	7,40	0,00	0,03
0,25	4,96	0,00	0,03	9,92	0,00	0,01
0,125	6,33	0,00	0,01	12,66	0,00	0,00
0,0625	7,46	0,00	0,00	14,92	0,00	0,00
		$x_\Sigma=0,30$ м			$x_\Sigma=0,15$ м	

Таблица 2

Результаты вычислений длины l_2 при $T_0=137,5$ Н

Амплитуда гармонических колебаний A_0 , м	Частота колебаний $\omega=1$ рад/с			Частота колебаний $\omega=0,5$ рад/с		
	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta \alpha_2$, рад	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta \alpha_2$, рад
2	2,73	0,18	0,37	5,46	0,09	0,18
1	3,80	0,03	0,13	7,62	0,02	0,07
0,5	5,19	0,01	0,05	10,48	0,00	0,02
0,25	6,77	0,00	0,02	14,03	0,00	0,01
0,125	8,02	0,00	0,01	17,82	0,00	0,00
0,0625	9,38	0,00	0,00	20,83	0,00	0,00
		$x_\Sigma=0,22$ м			$x_\Sigma=0,11$ м	

Таблица 3

Результаты вычислений длины l_2 при $T_0=275$ Н

Амплитуда гармонических колебаний A_0 , м	Частота колебаний $\omega=1$ рад/с			Частота колебаний $\omega=0,5$ рад/с		
	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta \alpha_2$, рад	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta \alpha_2$, рад
2	3,85	0,13	0,26	7,71	0,06	0,13
1	5,37	0,02	0,09	10,75	0,01	0,05
0,5	7,40	0,00	0,03	14,80	0,00	0,02
0,25	9,92	0,00	0,01	19,84	0,00	0,01
0,125	12,66	0,00	0,00	25,31	0,00	0,00
0,0625	14,92	0,00	0,00	29,85	0,00	0,00
		$x_\Sigma=0,15$ м			$x_\Sigma=0,07$ м	

Таблица 4

Результаты вычислений длины l_2 при $T_0=618,75$ Н

Амплитуда гармонических колебаний A_0 , м	Частота колебаний $\omega=1$ рад/с			Частота колебаний $\omega=0,5$ рад/с		
	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta\alpha_2$, рад	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta\alpha_2$, рад
2	5,78	0,09	0,17	11,56	0,04	0,09
1	8,07	0,02	0,06	16,13	0,01	0,03
0,5	11,10	0,00	0,02	22,20	0,00	0,01
0,25	17,06	0,00	0,01	29,76	0,00	0,00
0,125	20,95	0,00	0,00	37,97	0,00	0,00
0,0625	23,56	0,00	0,00	44,77	0,00	0,00
		$x_\Sigma=0,11$ м			$x_\Sigma=0,05$ м	

Таблица 5

Результаты вычислений длины l_2 при $T_0=1000$ Н

Амплитуда гармонических колебаний A_0 , м	Частота колебаний $\omega=1$ рад/с			Частота колебаний $\omega=0,5$ рад/с		
	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta\alpha_2$, рад	Длина l_2 , м	Горизонтальные перемещения x_2 , м	Оценка амплитуды изменения наклона троса $\Delta\alpha_2$, рад
2	7,35	0,07	0,14	14,70	0,03	0,07
1	10,25	0,01	0,05	20,51	0,01	0,02
0,5	14,11	0,00	0,02	28,23	0,00	0,01
0,25	18,92	0,00	0,01	37,84	0,00	0,00
0,125	24,13	0,00	0,00	48,27	0,00	0,00
0,0625	28,46	0,00	0,00	56,91	0,00	0,00
		$x_\Sigma=0,08$ м			$x_\Sigma=0,04$ м	

По результатам вычислений, представленным в таблицах, видно, что при малых начальных натяжениях (таблица 3) вертикальные колебания КС гасятся на меньшей длине троса, однако при этом происходит трансформация вертикальных колебаний в горизонтальные амплитуды, скорости и ускорения которых при $\omega=1$ рад/с и $A_0=2$ м составят от 0,2 до 0,3 м/с и от 0,2 до 0,3 м/с² соответственно.

Синтез нечёткого регулятора в пакете Fuzzy Logic

Методология нечеткого моделирования не заменяет, и не исключает рассмотренную выше методику, а конкретизирует последнюю применительно к процессу построения и использования нечетких моделей сложных систем [16]. Целесообразно применять современные методы, не требующие точного решения для моделей объектов управления при ограниченных наборах граничных условий, которые, тем не менее, строятся на численных методах описания статики и динамики. К ним относятся методы, которые используют нечеткую логику при реализации отдельных регуляторов или систем управления подвижными объектами в целом.

Разработку нечёткой модели управления УМКБ выполним с использованием приложения Fuzzy Logic системы MATLAB.

Зададим 2 входных переменных: «длина троса», «сила», и одну выходную переменную с именем

«амплитуда колебаний заборной системы, буксируемой за судном и испытывающей возмущения» [16-17].

Параметры управления взяты из таблиц 1-5 результатов вычисления:

Для решения этой задачи мы построили базу правил соответствующей системы нечёткого вывода, которая содержит 5 правила нечётких продукций вида:

ПРАВИЛО_1: ЕСЛИ « δ_1 есть PS1» И « δ_2 есть PS2» ТО « δ_3 есть PS3»

ПРАВИЛО_2: ЕСЛИ « δ_1 есть PS» И « δ_2 есть PS» ТО « δ_3 есть PS»

ПРАВИЛО_3: ЕСЛИ « δ_1 есть PM» И « δ_2 есть PM» ТО « δ_3 есть PM»

ПРАВИЛО_4: ЕСЛИ « δ_1 есть PB» И « δ_2 есть PB» ТО « δ_3 есть PB»

ПРАВИЛО_5: ЕСЛИ « δ_1 есть PN» И « δ_2 есть PB» ТО « δ_3 есть PB» [16].

Для сокращения записи правил использовали следующие обозначения: δ_1 – первая входная лингвистическая переменная с именем «длина троса»; δ_2 – вторая входная лингвистическая переменная с именем «сила»; δ_3 – третья выходная лингвистическая переменная с именем «амплитуда колебаний заборной системы, буксируемой за судном и испытывающей возмущения» [16-17].

Следуя заданным параметрам управления, определим настроечные параметры регуляторов, по

которым строим вывод для функций управления, как показано на рисунке 1.

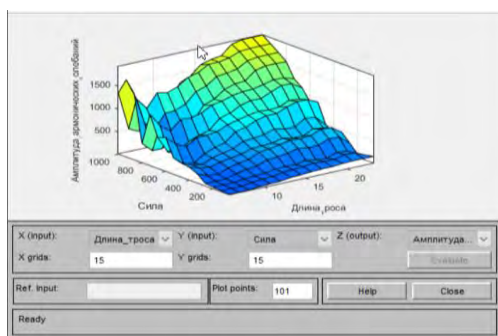


Рис. 1. Тело неопределённости настроечных параметров регуляторов

На рисунке 1 представлен нечеткий регулятор, данная поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели управления УМБК. Выходным параметром является амплитуда колебаний заборной системы, буксируемой за судном и испытывающей возмущения, посредством нечёткого

контроллера управления по входным параметрам длины троса и силы.

Заключение

Таким образом, амплитуда скорости горизонтальных колебаний при малых скоростях буксировки становится соизмеримой со скоростью буксировки и не зависит от длины троса. Это, неизбежно, приведет к раскачиванию ННП по углу дифферента из-за несимметричности обтекания и распределения масс ННП.

Из приведенных расчетов видно, что начальное натяжение в КС должно быть не менее 600 Н и длина троса при этом составлять порядка 80 м. В этом случае вертикальные колебания практически полностью гасятся по длине КС, а трансформация их в горизонтальные будет незначительной.

Сечения тела неопределённости в границах заданных настроечных величин регуляторов определяет влияние связанных величин регуляторов на процесс самовыравнивания объекта управления.

Результаты моделирования эксплуатационно-технических характеристик позволяют реализовать технологию управления статической и динамической устойчивости УМБК при различной длине буксирной линии.

Литература

1. Мартынов В.Л., Сиек Ю.Л., Борисов А.Н. и др. О роли информационно-измерительных и управляющих систем при поиске объектов подводными аппаратами, Морские интеллектуальные технологии. № 4 часть 2, 2022, С. 97—102.
2. Лютикова М. Н. Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна. Морские интеллектуальные технологии. № 3 part 1. 2022, С. 153-159.
3. Лютикова М.Н., Бузенков И.И., Халеева Е.П., Малахов С.О., Цепордей О.В. Совмещение систем позиционирования универсальных многоцелевых буксируемых геофизических комплексов с системами судна-носителя, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 191—199.
4. Трунин К.С. Уравнения динамики элемента гибкой связи морской привязной системы. Сб. науч. тр. Национального университета кораблестроения. Николаев. 2017. № 1. С. 18-25.
5. Хекерт Е. В., Данцевич И. М., Лютикова М. Н., Халеева Е. П. Технология управления геофизическим судном для изучения Мирового океана. В серии конференций IOP: Earth and Environmental Science, 872, № 1, 2021, с. 012001.
6. Гайкович, А. И., Никитин, Н. В., Суслов, А. Н., & Хань, Б. Аналитический метод определения мощности энергетической установки катамарана. Морские интеллектуальные технологии. 2019, С. 80.
7. Данцевич, И. М., Лютикова, М. Н. Результаты исследования управления системой «судно-заборное оборудование» в продольно-вертикальной плоскости. Эксплуатация морского транспорта, (3), 2021, с.76-81.
8. Vineet K.S., Yvss S., Mohammad T. Dynamic behavior of underwater towed-cable in linear profile. Int. Journal of Scientific & Engineering Research. 2011. V. 2, No. 7. P. 1-10.
9. Наумов, В. А. Силы гидродинамического сопротивления гибких связей буксируемых подводных объектов. Морские интеллектуальные технологии, (3-1), 2017, с.158-162.
10. Белов В.А. Гидродинамика нитей, сетей и сетных конструкций. Калининград: КГТУ, 2000. 201 с.
11. Грумондз, В. Т., Пильгунов, Р. В., & Виноградов, М. В. Динамика продольного движения подводного буксируемого аппарата в задаче мониторинга заданной области континентального шельфа. Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение», 6 (117), 2017, с.19-34.
12. Хекерт Е. В., Лютикова М. Н. Системы питания с нейтральной плавучестью для морских применений. Международная конференция по приложениям в электронике и вычислительных системах. Springer, Cham, 2023, с. 108-116.
13. Wang, J. Will future microbots be task-specific customized machines or multi-purpose “all in one” vehicles? Nature Communications, 12(1), 2021, 7125.
14. Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 242—250.
15. Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Показатели технических параметров телеуправляемых необитаемых подводных комплексов в сравнении альтернатив. Морские интеллектуальные технологии 2023. № 2 часть 1, С. 209—217.

16. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде Matlab и Fuzzy Tesh. СПб.: БХВ. Петербург, 2005. 736 с.
17. Данцевич, И. М., & Лютикова, М. Н. Разработка системы нечёткого вывода на основе регулятора энергетического судового оборудования по технологии Fuzzy logic пакета MatLab. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, (1 (186)), 2016, 20-24.

References

- 1 Martynov V.L., Siek Y.L., Borisov A.N., etc. On the role of information and measuring and control systems in the search for objects by underwater vehicles, *Marine intelligent technologies*. No. 4 part 2, 2022, S. 97 - 102.
- 2 Lyutikova M.N. Improving the management of a multi-purpose towed complex using a neural network controller in the asymptotics of Bernstein polynomials. *Marine intelligent technologies*. №. 3 part 1. 2022, S. 153-159.
- 3 Lyutikova M.N., Buzenkov I.I., Khaleeva E.P., Malakhov S.O., Tsepordey O.V. Combination of positioning systems for universal multi-purpose towed geophysical complexes with carrier vessel systems, *Marine intelligent technologies*. 2023. No. 1 Part 1, S. 191 - 199
- 4 Trunin K.S. Equations of dynamics of the flexible coupling element of the marine tether system. *Sat. scientific. tr. Nazio-nal University of Shipbuilding. Nikolaev*. 2017. № 1. S. 18-25.
- 5 Khekert, E. V., Dantsevich, I. M., Lyutikova, M. N., & Khaleeva, E. P. The technology of geophysical vessel control for the study of the world ocean. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 872, No. 1, 2021, p. 012001.
- 6 Gaikovich, A.I., Nikitin, N.V., Suslov, A.N., & Han, B. Analytical method for determining the power of a catamaran power plant. *Marine Intelligent Technologies*. 2019, P. 80.
- 7 Dantsevich, I. M., Lyutikova, M. N. Results of the study of the control of the ship-outboard mining system in the longitudinal-vertical plane. *Operation of Marine Transport*, (3), 2021, с.76-81.
- 8 Vineet K.S., Yvss S., Mohammad T. Dynamic behavior of underwater towed-cable in linear profile. *Int. Journal of Scientific & Engineering Research*. 2011. V. 2, No. 7. P. 1-10.
- 9 Naumov, V. A. Forces of hydrodynamic resistance of flexible links of towed underwater objects. *Marine Intelligent Technologies*, (3-1), 2017, pp.158-162.
- 10 Belov V.A. Hydrodynamics of threads, networks and net structures. Kaliningrad: KSTU, 2000. 201 с.
- 11 Grumonds, V. T., Pilgunov, R. V., Vinogradov, M. V. Dynamics of the longitudinal movement of the underwater buxiated apparatus in the task of monitoring a given area of the continental shelf. *Bulletin of Moscow State Technical University named after NE Bauman. Series "Mechanical Engineering"*, 6 (117), 2017, с.19-34.
- 12 Khekert E.V. and M. N. Lyutikova M.N, Neutral buoyancy power supply systems for marine applications. *International conference on applications in electronics and computing systems*. Springer and Cham, 2023, p. 108-116.
- 13 Wang, J. Will future microbots be task-specific customized machines or multi-purpose "all in one" vehicles?. *Nature Communications*, 12(1), 2021, 7125.
- 14 Dantsevich I.M., Lubentsov V.F. Determination of Parameters of Hydrodynamic Coefficients in Operating Control Functions of Remote-Controlled Unmanned Vehicles, *Marine Intelligent Technologies*. 2022. No. 4 part 1, S. 242 - 250.
- 15 I.M. Dantsevich, V.F. Lubentsov. Indicators of technical parameters of remote-controlled uninhabited sub-water systems in comparability of alternatives. *Marine Intelligent Technologies* 2023. No. 2 part 1, S. 209 - 217.
- 16 Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in Matlab and Fuzzy Tesh environment. St. Petersburg: BHV. Petersburg, 2005. 736 p.
- 17 Dantsevich, I. M., & Lyutikova, M. N. Development of a fuzzy output system based on the regulator of power engineering equipment using the Fuzzy logic technology of the MatLab package. *News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, (1 (186)), 2016, 20-24.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D.(Eng), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Бузенков Игорь Иванович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: igor.buzenkov@mail.ru

Халеева Елена Петровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: bakay_e_p@mail.ru

Igor I. Buzenkov, Ph.D. (Eng), associate professor, chief of «Radio engineering and Information Technologies» department at Admiral Ushakov Maritime State University, 93, Lenina avenue, Novorossiysk, Krasnodar region, 353924, Russian Federation, e-mail: igor.buzenkov@mail.ru

Elena P. Khaleeva, Ph.D.(Edu), Candidate of Sciences in Pedagogy, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: bakay_e_p@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.07.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.11.2023.

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.025>

Метод адаптивной пороговой вейвлет-обработки импульсных сигналов

Тристанов А.Б.¹ alexander.tristanov@klgtu.ru, Луковенкова О.О.² o.o.lukovenkova@yandex.ru,Солодчук А.А.² aleksandra@ikir.ru¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», ²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Аннотация. Регистрируемые на геодинамическом полигоне полуострова Камчатка сигналы геоакустической эмиссии (ГАЭ) являются сложным многокомпонентным источником информации о напряженно-деформированном состоянии среды на мезомасштабах. Данный вид сигналов имеет импульсную природу. В ряде работ было показано, что нарастание интенсивности следования импульсов является возможным предвестником землетрясений. Сигналы ГАЭ часто содержат шумы и помехи, появление которых обусловлено рядом причин, например, неоднородностью среды распространения, влиянием погодных условий, человеческой деятельностью и др. Так, сигналы ГАЭ содержат постоянно присутствующий фоновый шум, при этом его интенсивность меняется с течением времени. Этот шум существенно искажает форму геоакустических импульсов и тем самым осложняет анализ сигналов, выделение его структурных компонент и, как следствие, снижает достоверность его прогностических возможностей. В представленной статье приведены результаты оценки фонового шума геоакустических сигналов. Показано, что фоновый шум сигналов ГАЭ по структуре похож на грубо оцифрованный Гауссов шум, а отношение сигнал/шум для одиночных импульсов в среднем составляет 17 дБ. На основе этих оценок для очистки сигнала от шума и восстановления формы одиночных импульсов предлагается метод адаптивной пороговой вейвлет-обработки. Вейвлет-преобразование является достаточно распространенным методом представления нестационарных сигналов с локализованными частотно-временными особенностями. Значение порога рассчитывается эмпирическим методом Байеса. Для вейвлет-обработки выбраны коэффленты четвертого порядка. В заключении приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие высокую эффективность использования выбранного метода для предобработки импульсных сигналов ГАЭ.

Ключевые слова: удаление шумов, адаптивная пороговая вейвлет-обработка, эмпирический метод Байеса, геоакустическая эмиссия

Для цитирования: Тристанов А.Б., Луковенкова О.О., Солодчук А.А. Метод адаптивной пороговой вейвлет-обработки импульсных сигналов. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 205—213. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.025

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.025>

Method of adaptive threshold wavelet processing of pulse signals

Alexander B. Tristanov¹ alexander.tristanov@klgtu.ru, Olga O. Lukovenkova² o.o.lukovenkova@yandex.ru,Alexandra A. Solodchuk² aleksandra@ikir.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, ²Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russian Federation

Abstract. Geoacoustic emission (GAE) signals recorded at the geodynamic test ground of the Kamchatka Peninsula are a complex multicomponent source of information about the stress-strain state of the environment at mesoscales. This type of signal has a pulse nature. A number of studies have shown that an increase in the intensity of pulse repetition is a possible precursor of earthquakes. GAE signals often contain noise and interference, the appearance of which is due to a number of reasons, for example, heterogeneity of the propagation medium, the influence of weather conditions, human activity, etc. Thus, GAE signals contain a constantly present background noise, and its intensity changes over time. This noise significantly distorts the shape of geoacoustic pulses and thereby complicates the analysis of signals, the identification of its structural components and, as a result, reduces the reliability of its predictive capabilities. The presented article presents the results of assessing the background noise of geoacoustic signals. It is shown that the background noise of GAE signals is similar in structure to roughly digitized Gaussian noise, and the signal-to-noise ratio for single pulses averages 17 dB. Based on these estimates, an adaptive threshold wavelet processing method is proposed to clear the signal from noise and restore the shape of single pulses. The wavelet transform is a fairly common method for representing non-stationary signals with localized time-frequency features. The threshold value is calculated using the empirical Bayes method. For wavelet processing, fourth-order coiflets were selected. In conclusion, the results of a computational experiment are presented, confirming the high efficiency of using the chosen method for preprocessing pulsed GAE signals.

Key words: noise removal, adaptive wavelet thresholding, empirical Bayes method, geoacoustic emission

For citation: Alexander B. Tristanov, Olga O. Lukovenkova, Alexandra A. Solodchuk Method of adaptive threshold wavelet processing of pulse signals Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 205—213. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.025

Введение

Наиболее распространенными проблемами обработки сигналов являются искажение формы и зашумленность. Эти проблемы характерны для сигналов разных типов: акустических, электрических, электромагнитных и др. На практике на форму сигналов влияют природные шумы, искусственные помехи, нелинейность приемного тракта, ограничения динамического диапазона, ошибки квантования, первичная аппаратная обработка и др. При этом многие перспективные методы анализа

(частотно-временные преобразования, разреженная аппроксимация, классификация, кластеризация и т.д.) чувствительны к искажениям временной формы сигналов, что негативно сказывается на качестве и точности результатов.

Представленная статья посвящена вопросам удаления шумов из сигналов геоакустической эмиссии (ГАЭ). Сигнал ГАЭ представляет собой высокочастотный импульсный сигнал с постоянно присутствующим нестационарным фоновым шумом (рис. 1а).

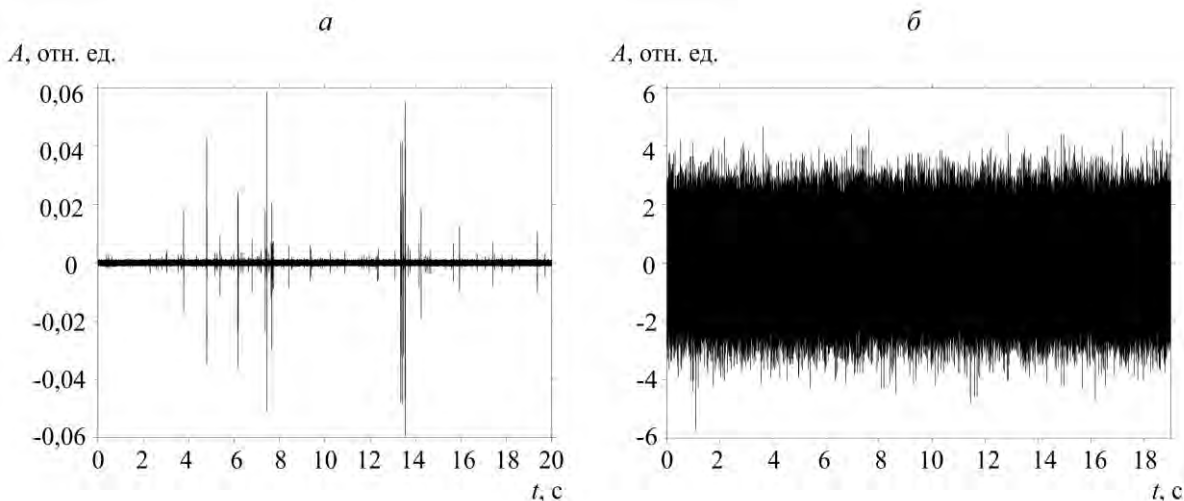


Рис. 1. Сигналы ГАЭ: а – сигнал, содержащий импульсы; б – сигнал, содержащий фоновый шум

Главными задачами обработки сигналов ГАЭ являются:

- выделение участков сигнала, содержащих импульсы;
- определение параметров каждого выделенного импульса;
- классификация импульсов;
- поиск аномалий на различных временных масштабах.

Для решения перечисленных задач в лаборатории акустических исследований Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН используются [1]:

- адаптивная пороговая схема для выделения импульсов из геоакустического сигнала;
- разреженная аппроксимация, использующаяся как метод анализа частотного состава импульсов;
- структурное описание формы импульсных сигналов;
- классификация импульсов на основе матриц структурного описания.

Если адаптивная пороговая схема для выделения импульсов построена таким образом, что устойчиво работает на сигналах с различным уровнем шума, то методы вторичной обработки и анализа предполагают применение к неискаженным (или слабо искаженным) импульсам. Сильная зашумленность приводит к появлению «ложных» локальных экстремумов, из-за которых возникают ошибки в оценке частотного состава и формируются фиктивные классы. Поэтому важно устранять шум и

искажения формы сигнала перед применением методов вторичной обработки и анализа.

Оценка параметров фонового шума

Перед выбором метода удаления шумов было проведено исследование параметров фонового шума геоакустических сигналов. Для этого из сигнала ГАЭ, зарегистрированного в пункте наблюдений «Карымшина» (52,83° с. ш., 158,13° в. д.) в условиях хорошей погоды (отсутствие осадков и сильного ветра) были выбраны фрагменты, не содержащие импульсов. Таким образом был сформирован сигнал, содержащий только фоновый шум (рис. 1б). Данный сигнал был масштабирован и смещен так, чтобы математическое ожидание μ равнялось 0 и среднеквадратическое отклонение σ принимало значение 1.

Оценить закон распределения случайной величины можно несколькими способами. Наиболее простым, применяющимся на первом этапе исследования, является построение гистограммы и графика квантилей (Q-Q график), по которым визуально можно оценить сходство распределения с одним из стандартных законов. На рис. 2а изображена гистограмма распределения амплитуд сигнала, число интервалов k выбрано по формуле Стерджесса $k = 1 + \log_2 N$, где N — количество измерений. На рис. 2б представлен график квантилей, построенный относительно значений стандартного нормального распределения $N(0, 1)$.

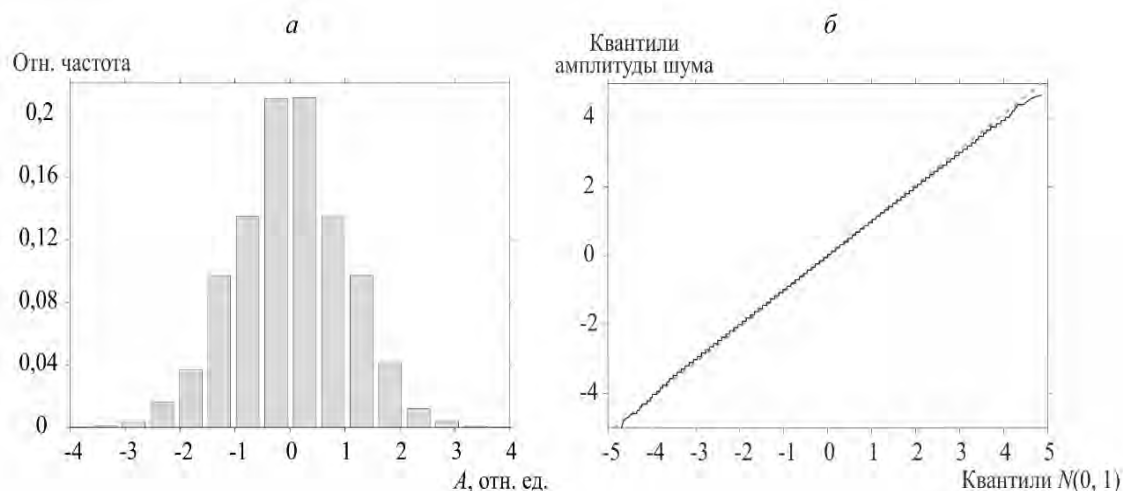


Рис. 2. Оценка закона распределения амплитуд фонового шума: а – гистограмма; б – график квантилей

Визуально распределение амплитуд фонового шума похоже на нормальное. Однако гипотеза о нормальности H_0 требует подтверждения. Для проверки соответствия некоторого распределения нормальному закону используются различные статистические критерии. Рассмотрим некоторые из них.

Критерий Пирсона, χ^2 — критерий, наиболее часто используемый для проверки гипотезы о принадлежности наблюдаемой выборки некому теоретическому закону распределения. Критерий χ^2 может ошибаться на выборках с низкочастотными (маловероятными) наблюдениями. Параметры распределения оцениваются по данным выборки [2].

Критерий Андерсона–Дарлинга — критерий для проверки гипотезы о принадлежности наблюдаемой выборки некому теоретическому закону распределения. Критерий применяется к выборкам объемом $N \geq 25$. Проверку можно проводить и при заданных, и при неизвестных параметрах распределения. Если параметры неизвестны, то оценивают, принадлежит ли эмпирическое распределение тому или иному семейству теоретических распределений (нормальных, экспоненциальных, логистических или др.) [3].

Критерий Лиллиефорса — модифицированный вариант критерия Колмогорова–Смирнова. Если параметры предполагаемого нормального распределения не известны и оцениваются из выборки данных, для определения, является ли статистика Колмогорова–Смирнова значимой, используются вероятности Лиллиефорса [4].

Результаты проверки статистической гипотезы H_0 (распределение амплитуд фонового шума имеет нормальный закон распределения $N(\mu, \sigma)$, μ и σ оцениваются по данным выборки) с помощью статистических критериев Пирсона, Андерсона–Дарлинга и Лиллиефорса приведены в таблице. H_1 — альтернативная гипотеза.

При увеличении размера выборочной совокупности большинство статистических тестов отклоняет гипотезу H_0 . Данный эффект может быть объяснен погрешностями квантования сигнала ГАЗ, т.е. возможно, что рассматриваемые данные до оцифровки имели нормальный закон распределения. Аналогово-цифровой преобразователь,

используемый в системе регистрации сигналов ГАЗ, имеет разрядность равную 16 бит (65536 уровней квантования сигнала, диапазон значений от -1 до 1). Согласно расчетам динамический диапазон фонового шума геоакустического сигнала содержит 112 уровней квантования (диапазон значений от $-0,00189$ до $0,001526$). В пользу данного предположения говорит внешний вид Q-Q графика (рис. 2б), на котором точки образуют ступенчатую линию.

Таблица 1.

Результаты применения статистических критериев

Критерий	Уровень значимости, α	Объем выборки, N	Принятая гипотеза H_0 или H_1
Пирсона	0,05	500	H_0
		1000	H_0
Андерсона–Дарлинга	0,05	500	H_0
		1000	H_1
Лиллиефорса	0,05	500	H_0
		1000	H_1

Для проверки выдвинутого предположения был сгенерирован сигнал, содержащий Гауссов шум. Этот сигнал был оцифрован т.о., чтобы динамический диапазон шума содержал 112 уровней квантования. Оценить различия двух выборок, принадлежащих неизвестным законам распределения можно, используя специальные статистические критерии. Распределения амплитуд реального и модельного сигнала сравнивались с помощью критерия Уилкоксона–Манна–Уитни [5]. Этот статистический критерий принимает или отвергает гипотезу H_0 о равенстве нулю медианы разностей двух выборок. На уровне значимости $\alpha = 0.05$ для выборок объемами $N = 500$ и $N = 1000$ наблюдений критерий Уилкоксона–Манна–Уитни подтвердил гипотезу H_0 . Данный результат инвариантен к изменению начальных значений генератора Гауссова шума. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что фоновый шум сигнала ГАЗ по своей структуре похож на грубо оцифрованный Гауссов шум.

Также были выполнены оценки отношения сигнал/шум (SNR) для фрагментов сигнала ГАЗ,

содержащих импульсы. Для амплитуды фонового шума были получены следующие оценки математического ожидания $\mu_{\text{шум}} = 0$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{шум}} = 0,00033$. SNR вычислялось отдельно для каждого из 1300 отобранных импульсов следующим образом

$$\text{SNR(дБ)} = 20 \log_{10} \frac{\sigma_{\text{сиг}}}{\sigma_{\text{шум}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{сиг}}$ — среднеквадратическое отклонение импульса, $\sigma_{\text{шум}}$ — среднеквадратическое отклонение наложенного шума, в качестве $\sigma_{\text{шум}}$ использовалась оценка, приведенная выше. Среднее значение SNR составило 17 дБ, худшее — 8,251 дБ, лучшее — 44,85 дБ.

Пороговая вейвлет-обработка как метод удаления шумов

Одним из популярных методов удаления шума, в том числе и нормально распределенного, и выделения информативной составляющей сигнала является пороговая вейвлет-обработка. Существует большое количество исследований, показывающих эффективность применения вейвлетов для устранения высокочастотных шумов из сигналов различной природы [6–9]. Процесс пороговой вейвлет-обработки состоит из трех этапов:

1. Прямое вейвлет-преобразование.

Предварительно выбирается тип вейвлета и уровень разложения N . В задачах шумоподавления, как правило, применяются ортогональные (вейвлеты Добеши, койфлеты, симлеты) и биортогональные семейства вейвлетов. Для разложения сигналов используется дискретное вейвлет-преобразование. Данное преобразование можно представить, как рекурсивный процесс фильтрации сигнала с помощью низкочастотного и высокочастотного фильтров с последующим прореживанием в два раза получающихся сигналов. Таким образом сигнал представляется в виде суммы одной аппроксимирующей и N детализирующих компонент. Максимально возможное количество уровней разложения N можно определить по формуле $N = \log_2 L$, где L — длина сигнала.

2. Пороговая обработка. Аппроксимирующая составляющая, как правило, содержит низкочастотную информацию (тренд) сигнала, а детализирующие — высокочастотную, поэтому удаление шумов заключается в пороговой обработке детализирующих коэффициентов. Для каждой детализирующей компоненты от 1 до N выбирается порог, и по определенному правилу производится модификация детализирующих коэффициентов. Наиболее распространенными являются мягкая и

жесткая пороговые схемы [10]. Модификация детализирующих коэффициентов по мягкой схеме производится по формуле

$$d_n^j = \begin{cases} 0, & |d_n^j| \leq \tau \\ d_n^j - \tau, & d_n^j > \tau \\ d_n^j + \tau, & d_n^j < -\tau \end{cases} \quad (2)$$

где d_n^j — j -й коэффициент компоненты уровня n , τ — пороговое значение, может определяться сразу для всех уровней (глобальный порог) или отдельно для каждого уровня детализации (локальный порог).

По жесткой схеме — по правилу:

$$d_n^j = \begin{cases} 0, & |d_n^j| \leq \tau \\ 0, & |d_n^j| > \tau \end{cases} \quad (3)$$

Для выбора порога τ существуют различные стратегии: универсальный порог [10], несмещенная оценка риска Штейна (SURE) [11], блочная оценка Джеймса–Штейна [12], FDR-порог [13], эмпирический метод Байеса [14], принцип минимакса [10] и др.

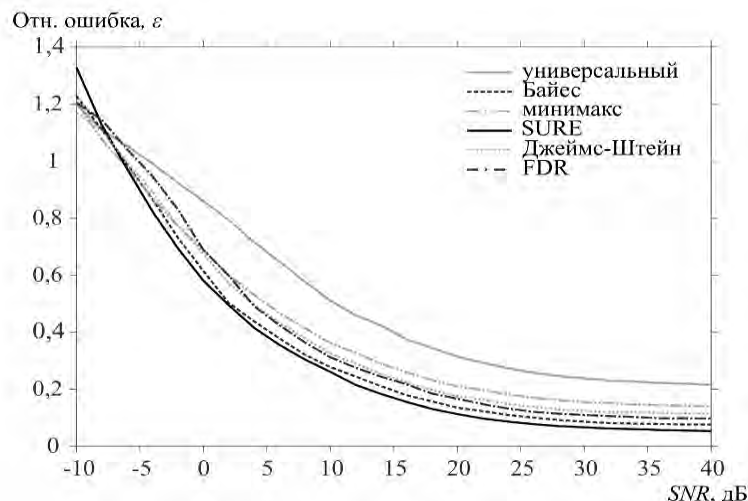
3. Обратное вейвлет-преобразование. После пороговой обработки детализирующих коэффициентов уровней от 1 до N сигнал восстанавливается обратным дискретным вейвлет-преобразованием.

Для выбора наиболее подходящего алгоритма вычисления порогового значения был проведен вычислительный эксперимент на модельном геоакустическом сигнале. Был сформирован сигнал, содержащий 100 импульсов с амплитудами от 0,05 до 1 условных единиц. На импульсы искусственно накладывался Гауссов шум различной амплитуды таким образом, чтобы SNR каждого изменялось от –10 до 40 дБ. Порог вычислялся следующими алгоритмами: универсальный порог, SURE, блочная оценка Джеймса–Штейна, FDR, эмпирический метод Байеса, минимаксная оценка. Для каждого значения SNR вычислялась средняя относительная ошибка вейвлет-обработки согласно.

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\|s_i(t) - \hat{s}_i(t)\|}{\|s_i(t)\|}, \quad (4)$$

где $s_i(t)$ — неискаженный импульс; $\hat{s}_i(t)$ — импульс после пороговой вейвлет-обработки; N — количество обработанных импульсов, $N = 100$.

Графики зависимостей ошибки от SNR для рассмотренных алгоритмов вычисления порога приведены на рис. 3. Лучшие результаты были получены с использованием эмпирического метода Байеса и SURE. На сильно зашумленных сигналах (SNR меньше –5 дБ) метод Байеса работает точнее. Рассмотрим эти методы более подробно.

Рис. 3. Графики $\varepsilon(\text{SNR})$, полученные для различных алгоритмов вычисления

Эмпирический метод Байеса

Пусть детализирующие коэффициенты, полученные при разложении искаженного сигнала, представляют собой сумму вейвлет-коэффициентов неискаженного сигнала и нормально распределенного шума

$$d_i = \mu_i + \varepsilon_i, \quad (5)$$

где d_i — детализирующие коэффициенты искаженного сигнала; μ_i — детализирующие коэффициенты неискаженного сигнала; ε_i — случайные значения, подчиняющиеся нормальному закону распределения $N(0, 1)$.

Предположим, что случайная величина d_i также подчиняется нормальному закону $d_i \sim N(\mu_i, 1)$ (если дисперсия σ^2 величины d_i не равна 1, то d_i нормируется делением на σ , а полученные в результате оценки умножаются на σ). При этом вейвлет-коэффициенты неискаженного сигнала μ_i разрежены (большое количество μ_i равно 0). Тогда априорное распределение μ_i может быть представлено в виде (6).

$$f_{\text{априор}}(\mu) = (1 - \omega)\delta_0(\mu) + \omega\gamma(\mu), \quad (6)$$

где ω — вероятность того, что μ примет ненулевое значение; $\delta_0(x)$ — дельта-функция; $\gamma(\mu)$ — симметричная унимодальная плотность вероятности распределения ненулевых значений μ

$$\gamma(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(1 - \frac{|\mu|D(|\mu|)}{\phi(|\mu|)} \right), \quad (7)$$

где $\bar{\Phi}(x) = 1 - \Phi(x)$, $\Phi(x)$ — функция распределения $N(0, 1)$; $\phi(x)$ — плотность вероятности

$N(0, 1)$. В [14] распределение (7) называется квази-Коши распределением.

Зная, что априорное распределение μ задается (6), а $X \sim N(\mu, 1)$, можно найти апостериорное распределение параметра μ при условии $X = d_i$. Далее возможны три варианта:

- оценка неизвестных параметров μ_i из (5) значением апостериорной медианы $\hat{\mu}(d_i, \omega)$
- оценка неизвестных параметров μ_i из (5) значением апостериорного математического ожидания $\bar{\mu}(d_i, \omega)$
- определение порогового значения $t(\omega)$, соответствующего самому большому значению d_i , для которого $\hat{\mu}(d_i, \omega) = 0$ и применение одной из пороговых схем (2), (3).

В каждом из трех вариантов требуется оценить вероятность ω . Для этого используется метод максимального правдоподобия, численно ищется максимум логарифмической функции правдоподобия

$$l(\omega) = \sum_{i=1}^K \log[(1 - \omega)\phi(d_i) + \omega g(d_i)], \quad (8)$$

где d_i — детализирующие коэффициенты искаженного сигнала; K — количество детализирующих коэффициентов; $\phi(x)$ — плотность вероятности $N(0, 1)$; $g(x) = \gamma \otimes \phi$, оператор « $\otimes$ » обозначает свертку. Формулы и подробное описание процесса вычислений для каждого из трех случаев приведены в [14].

На рис. 4а изображены графики ошибки (4) от SNR, полученные для различных схем пороговой обработки. Лучший результат получен для случая, когда детализирующие вейвлет-коэффициенты оцениваются значением апостериорного математического ожидания $\bar{\mu}(d_i, \omega)$.

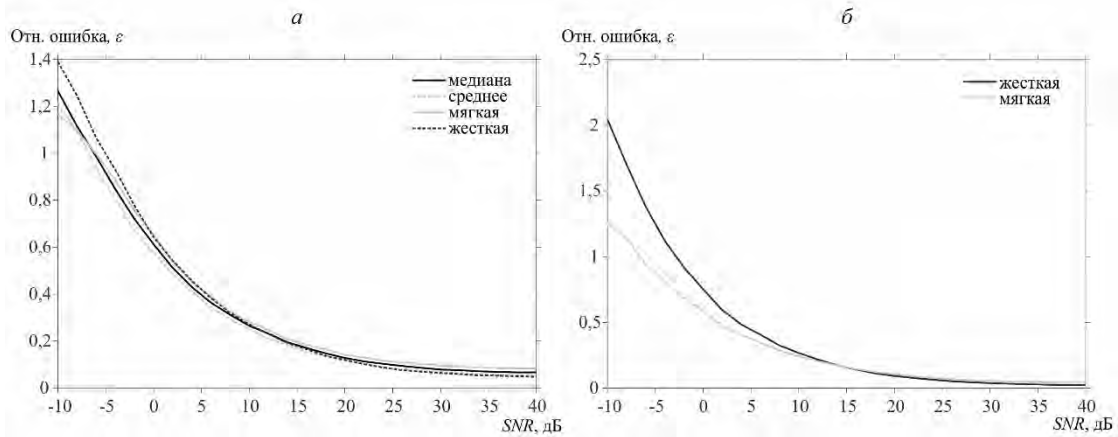


Рис. 4. Графики $\varepsilon(\text{SNR})$, полученные для различных пороговых схем: а — эмпирическим методом Байеса; б — методом SURE

Несмещенная оценка риска Штейна

Идея этого алгоритма вычисления порогового значения заключается в нахождении минимума несмещенной оценки риска Штейна. Оценка риска Штейна для детализирующей компоненты n -го уровня разложения определяется выражением

$$\text{SURE}_n(t) = K_n + \sum_{j=1}^{K_n} \left[\min \left(\frac{|d_n^j|}{\sigma}, t \right) - 2 \sum_{j=1}^{K_n} g \left(\frac{|d_n^j|}{\sigma}, t \right) \right] \quad (9)$$

где K_n — количество детализирующих коэффициентов n -го уровня разложения; d_n^j — детализирующие коэффициенты n -го уровня разложения; σ — оценка уровня шума, ее можно вычислить $\sigma = 1,483 \cdot M_e[d_n - M_e(d_n)]$, M_e — медиана; $g(x, y)$ — условная функция, принимающая значение 1, если $x \leq y$, и 0 — в противном случае.

Значение порога вычисляется следующим образом

$$t^{\text{SURE}} = \sigma \cdot \arg \min_t \text{SURE}_n(t). \quad (10)$$

В работе [11] показано, что при использовании мягкой пороговой схемы (1) в случае, когда

$$\frac{1}{K_n} \sum_{j=1}^{K_n} \left[\left(\frac{|d_n^j|}{\sigma} \right)^2 - 1 \right] \leq \frac{(\log_2 K_n)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{K_n}}, \quad (11)$$

вместо (10) предпочтительнее использовать универсальный порог $t = \sigma \sqrt{2 \log K_n}$

На рис. 4б изображены графики $\varepsilon(\text{SNR})$, полученные для жесткой и мягкой схем пороговой обработки. Лучший результат получен для случая, когда пороговая обработка производится по мягкой схеме (2).

Выбор семейства вейвлетов

Как упоминалось выше, в задачах шумоподавления чаще всего применяются

ортогональные и биортогональные вейвлеты. В представленной работе рассматриваются следующие семейства вейвлетов [15].

Вейвлеты Добеши. Семейство ортогональных вейвлетов с компактным носителем, коэффициенты вейвлет-фильтров вычисляются итерационным путем. Характеризуются максимальным числом нулевых моментов для заданной длины вейвлет-фильтра. У материнского вейвлета Добеши с длиной фильтра $2N$ отсчетов будет N нулевых моментов (обозначается dbN , N называют порядком семейства вейвлетов). Чем больше нулевых моментов у ортогонального вейвлета, тем выше обеспечиваемая степень сглаживания. Однако увеличение количества нулевых моментов приводит к увеличению объема вычислений при обработке сигналов.

Симлеты. Модифицированные вейвлеты Добеши, имеющие минимально возможную асимметрию при заданном числе нулевых моментов. Фильтр симлета с N нулевыми моментами будет содержать $2N$ коэффициентов (обозначается symN). Данное семейство вейвлетов наиболее подходит для обработки симметричных сигналов.

Койфлеты. Являются частным случаем вейвлетов Добеши: к условиям для определения коэффициентов фильтра добавляются условия, вытекающие из наличия нулевых моментов у масштабирующей функции. Таким образом койфлет с длиной фильтра $6N$ отсчетов будет иметь по N нулевых моментов у материнской и масштабирующей функций (обозначается coifN). Койфлеты более симметричны чем, вейвлеты Добеши

Эксперимент на модельных данных показывает, что наиболее точные результаты получаются при использовании койфлетов четвертого порядка, вейвлетов Добеши и симлетов высоких порядков (от восьмого и выше). На рис. 5 изображены графики $\varepsilon(\text{SNR})$, полученные эмпирическим методом Байеса при использовании различных семейств вейвлетов.

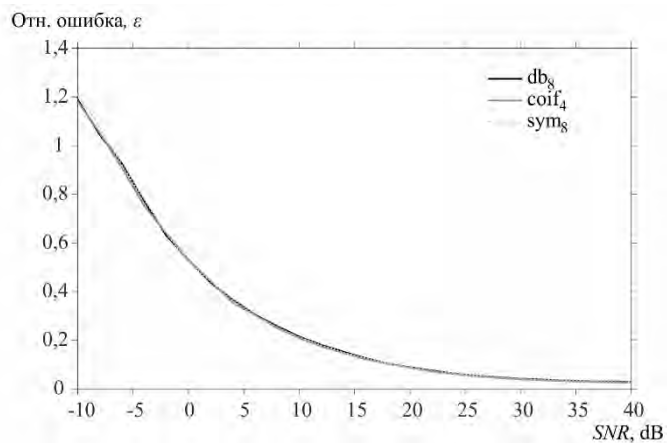


Рис. 5. Графики $\varepsilon(SNR)$, полученные эмпирическим методом Байеса при использовании различных семейств вейвлетов

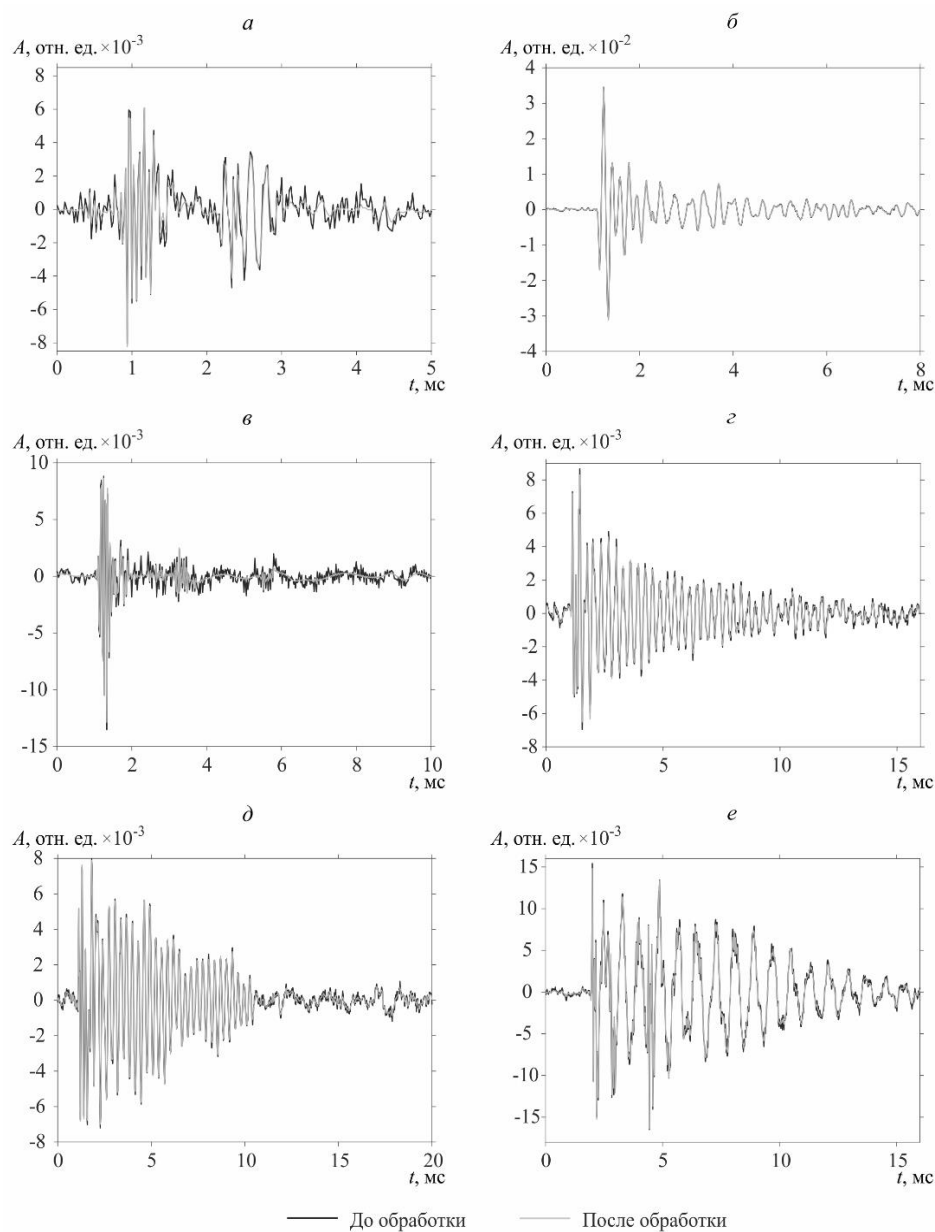


Рис. 6. Результаты применения эмпирического метода Байеса к геоакустическим импульсам

Апробация метода на реальных данных

Согласно результатам, полученным в ходе экспериментов над модельными данными, в качестве основного метода восстановления и очистки от шумов геоакустических сигналов был выбран эмпирический метод Байеса (вейвлет-коэффициенты оцениваются значением апостериорного математического ожидания, достигается максимальный уровень разложения). Его теоретические основы предполагают удаление нормально распределенного шума, на который по своей структуре похож фоновый шум сигналов ГАЭ. В качестве базиса было выбрано семейство койфлетов четвертого порядка, однако также возможно использование вейвлетов Добеши и симлетов от восьмого порядка и выше.

На рис. 6а–е изображены результаты обработки геоакустических импульсов различной формы, зарегистрированных в январе 2017 года. Обработанные с помощью вейвлетов сигналы сглажены и очищены от шумов, осложняющих их анализ. При этом степень очистки зависит от уровня шума, например, на рис. 6а,в приведены результаты

обработки сильно искаженных импульсов, на рис. 6б — неискаженного импульса, на рис. 6г–е — импульсов со средним уровнем шума.

Заключение

Регистрируемые геоакустические сигналы часто сильно искажены и зашумлены, при этом уровень шума постоянно меняется. Это обстоятельство существенно осложняет процессы идентификации, анализа и классификации этих сигналов. Анализ фонового шума сигналов ГАЭ показывает, что он по своей структуре похож на грубо оцифрованный Гауссов шум. Поэтому авторы предлагают использовать адаптивную пороговую вейвлет-обработку в качестве метода первичной обработки сигналов. Эксперименты на модельных данных показали, что наилучшее качество шумоподавления достигается при использовании эмпирического метода Байеса и койфлетов четвертого порядка. Результаты обработки реальных данных подтверждают эффективность использования выбранного метода для предобработки импульсных геоакустических сигналов.

Литература

1. Комплексный анализ акустических и электромагнитных сигналов для оценки уровня сейсмической опасности: монография / Марапупец Ю. В., Сенкевич Ю. И., Луковенкова О. О., Солодчук А. А., Ларионов И. А., Мищенко М. А., Малкин Е. И., Щербина А. О., Гапеев М. И... Владивосток: Дальнаука, 2020. 120 с.
2. Greenwood P. E., Nikulin M. S. A guide to chi-squared testing. New York: Wiley, 1996. 280 с.
3. Anderson T. W., Darling D. A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes // *Annals of Mathematical Statistics*. 1952. V. 23. P. 193–212.
4. Lilliefors H. W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *Journal of the American Statistical Association*. 1967. V. 62(318). P. 399–402.
5. Hollander M., Wolfe D. Nonparametric Statistical Methods. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 779 с.
6. Chang S. G., Yu B., Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2000. V. 9. P. 1532–1546.
7. Alfaouri M., Daqrouq K. ECG Signal Denoising By Wavelet Transform Thresholding // *American Journal of Applied Sciences*. 2008. V. 5(3). P. 276–281.
8. Srivastava M., Anderson C. L., Freed J. H. A New Wavelet Denoising Method for Selecting Decomposition Levels and Noise Thresholds // *IEEE Access*. 2016. V. 4. P. 3862–3877.
9. Srikar G., Prasad Ch. R. An Enhanced Audio Noise Removal Based on Wavelet Transform and Filters // *Advances in Computational Sciences and Technology*. 2017. T. 10. C. 3111–3121.
10. *Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology* / под ред. D. Baleanu. IntechOpen, 2012. P. 59–80.
11. Donoho D. L. De-noising by soft-thresholding // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1995. V. 41. P. 613–627.
12. Cai T. On block thresholding in wavelet regression: Adaptivity, block size, and threshold level // *Statistica Sinica*. 2002. V. 12. P. 1241–1273.
13. Special Invited Lecture: Adapting to Unknown Sparsity by Controlling the False Discovery Rate / F. Abramovich, Y. Benjamini, D. L. Donoho, I. M. Johnstone // *The Annals of Statistics*. 2006. V. 34. P. 584–653.
14. Johnstone I. M., Silverman B. W. Needles and Straw in Haystacks: Empirical Bayes Estimates of Possibly Sparse Sequences // *The Annals of Statistics*. 2004. V. 32. P. 1594–1649.
15. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia, Pa: SIAM, 1992. 377 с.

References

1. Kompleksnyj analiz akusticheskikh i elektromagnitnykh signalov dlya ocenki urovnya sejsmicheskoy opasnosti: monografiya / Marapulec YU. V., Senkevich YU. I., Lukovenkova O. O., Solodchuk A. A., Larionov I. A., Mishchenko M. A., Malkin E. I., SHCHerbina A. O., Gapeev M. I... Vladivostok: Dal'nauka, 2020. 120 s. Anderson T. W., Darling D. A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes // *Annals of Mathematical Statistics*. 1952. V. 23. P. 193–212.
2. Greenwood P. E., Nikulin M. S. A guide to chi-squared testing. New York: Wiley, 1996. 280 с.
3. Anderson T. W., Darling D. A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes // *Annals of Mathematical Statistics*. 1952. V. 23. P. 193–212.
4. Lilliefors H. W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *Journal of the American Statistical Association*. 1967. V. 62(318). P. 399–402.
5. Hollander M., Wolfe D. Nonparametric Statistical Methods. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 779 с.

6. Chang S. G., Yu B., Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression // IEEE Transactions on Image Processing. 2000. V. 9. P. 1532–1546.
7. Alfaouri M., Daqrouq K. ECG Signal Denoising By Wavelet Transform Thresholding // American Journal of Applied Sciences. 2008. V. 5(3). P. 276–281.
8. Srivastava M., Anderson C. L., Freed J. H. A New Wavelet Denoising Method for Selecting Decomposition Levels and Noise Thresholds // IEEE Access. 2016. V. 4. P. 3862–3877.
9. Srikar G., Prasad Ch. R. An Enhanced Audio Noise Removal Based on Wavelet Transform and Filters // Advances in Computational Sciences and Technology. 2017. T. 10. C. 3111–3121.
10. Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology / под ред. D. Baleanu. IntechOpen, 2012. P. 59–80.
11. Donoho D. L. De-noising by soft-thresholding // IEEE Transactions on Information Theory. 1995. V. 41. P. 613–627.
12. Cai T. On block thresholding in wavelet regression: Adaptivity, block size, and threshold level // Statistica Sinica. 2002. V. 12. P. 1241–1273.
13. Special Invited Lecture: Adapting to Unknown Sparsity by Controlling the False Discovery Rate / F. Abramovich, Y. Benjamini, D. L. Donoho, I. M. Johnstone // The Annals of Statistics. 2006. V. 34. P. 584–653.
14. Johnstone I. M., Silverman B. W. Needles and Straw in Haystacks: Empirical Bayes Estimates of Possibly Sparse Sequences // The Annals of Statistics. 2004. V. 32. P. 1594–1649.
15. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia, Pa: SIAM, 1992. 377 c.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тристанов Александр Борисович, кандидат технических наук, доцент, директор института цифровых технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236022, Россия, г. Калининград, Советский пр., 1, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Alexander B. Tristanov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, director of digital technology institute, Kaliningrad State Technical University, Sovietsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russia, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Луковенкова Ольга Олеговна, кандидат технических наук, с.н.с., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034 с. Паратунка, Камчатский край, Россия, e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

Olga O. Lukovenkova, Ph.D. (Eng), Senior Researcher; Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 684034 Russia, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7. e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

Солодчук Александра Андреевна, кандидат физико-математических наук, с.н.с., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия, e-mail: aleksandra@ikir.ru

Alexandra A. Solodchuk, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher; Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034 Russia Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7. e-mail: aleksandra@ikir.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 28.10.2023.

Научная статья

УДК 004.8+338.45

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.026>

Нейросетевое прогнозирование трудового потенциала экипажей рыбопромысловых судов

Огий О.Г.¹ oksana.ogij@klgtu.ru, Осипов В.Ю.² osipov.v@iias.spb.su¹Калининградский государственный технический университет, ²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Аннотация. В работе представлен способ нейросетевого прогнозирования сложного, нечетко определенного объекта – трудового потенциала, применительно к промышленному рыболовству. На фоне отсутствия методик комплексной оценки влияния человеческого ресурса и условий труда экипажей рыбопромысловых судов на результативность их работы исследование представляется актуальным.

Многopараметрическая оценка характеристик экипажа производится с использованием специального обследования и последующего построения зависимостей от возрастных интервалов. В основе предлагаемой модели лежит интеллектуальное ядро, состоящее из двух одинаковых рекуррентных нейронных сетей с управляемыми элементами. Представлены результаты нейросетевого прогнозирования.

Описанный метод позволяет находить целесообразные решения по достижению результативности, перебирая альтернативные варианты управления трудовым потенциалом, синтезируя и оценивая для них результаты прогнозов. Предусмотрена возможность прогнозирования трудовых потенциалов с заданием планируемых условий их проявления. Полученные результаты применимы не только для промышленного рыболовства, но и для других видов хозяйственной деятельности, но требуют проведения отдельных исследований по сбору и нейросетевой обработке первичных данных.

Ключевые слова: трудовой потенциал, результативность, рекуррентная нейронная сеть, прогнозирование, управление.

Для цитирования: Огий О.Г., Осипов В.Ю. Нейросетевое прогнозирование трудового потенциала экипажей рыбопромысловых судов, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 214—223. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.026

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.026>

Neural Network Forecasting of Labor Potential of Fishing Vessel Crews

Oksana G. Ogij¹ oksana.ogij@klgtu.ru, Vasiliy Y. Osipov² osipov.v@iias.spb.su¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, ²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper presents a method of neural network forecasting of a complex, indistinctly defined object – labor potential, in relation to industrial fishing. Against the background of the lack of methods for a comprehensive assessment of the impact of human resources and working conditions of the crews of fishing vessels on the effectiveness of their work, the study seems relevant.

Multiparameter assessment of crew characteristics is carried out using a special survey and subsequent construction of dependencies on age intervals. The proposed model is based on an intelligent core consisting of two identical recurrent neural networks with controlled elements. The results of neural network forecasting are presented.

The described method makes it possible to find expedient solutions to achieve efficiency by sorting through alternative options for managing labor potential, synthesizing and evaluating the results of forecasts for them. It is possible to predict labor potentials with the set of planned conditions for their manifestation. The results obtained are applicable not only for industrial fishing, but also for other types of economic activity, but require separate studies on the collection and neural network processing of primary data.

Key words: labor potential, effectiveness, recurrent neural network, forecasting, management.

For citation: Ogij O.G., Osipov V.Y. Neural Network Forecasting of Labor Potential of Fishing Vessel Crews, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 214—223. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.026

Введение

Рыбохозяйственный комплекс является важным сектором национальной экономики; включающим добычу, переработку, воспроизводство водных биологических ресурсов, а также интенсивно формирующийся комплекс индустриальной аквакультуры. Отраслевая архитектура включает множество разнообразных организаций: предприятий, учреждений, рыболовческих колхозов,

союзов и групп компаний, консорциумов. Результативность каждого экономического актора вносит вклад в общую результативность отрасли, формируя её способность достигать стратегических целей. С этой точки зрения проблема результативности рыбохозяйственных организаций представляет собой актуальное и важное направление исследований и управления. Анализ того, насколько способности актора могут перерасти в возможности достигать целей довольно сложная

методологическая исследовательская задача. Необходимо определить факторы, определяющие способности, а также оценить степень и характер их влияния.

Укрупненно такие факторы можно разделить на две группы: 1) относящиеся к человеку; 2) относящиеся к системе и среде. Способности работника в условиях определенной трудовой среды и системы управления формируют возможности реализации его трудовой функции как целевой, а также его вклада в общую результативность коллектива и организации, частью которых является.

Решение задачи управления результативностью экономических акторов рыбохозяйственного комплекса определяет необходимость оценки, прогнозирования и последующего управления их трудовым потенциалом.

Основным ядром промышленного рыболовства является экипаж рыбопромыслового судна как экономический актор, относительно автономная единица управления и носитель трудового потенциала, формирование, реализация и воспроизводство которого определяет текущую и перспективную результативность судна, и его вклад в результативность флота компании, рыбохозяйственного бассейна и, в конечном счете, отрасли.

Факторы трудового потенциала, относящиеся к человеку, в нашем случае, члену экипажа рыбопромыслового судна, определяющие его способности и возможности выполнения трудовой функции включают социально-демографические индикаторы, (возраст, семейное положение, место и условия проживания и др.), показатели текущего физического состояния и потенциала здоровья; особенности личности и характера; компетентность (уровень образования, трудовой стаж и опыт, склонность к саморазвитию и обучению новому); характеристику трудового поведения (ценностные ориентации, характер мотивации, культурные установки).

Факторы среды и системы управления, определяющие трудовой потенциал также разнообразны и мультипараметричны. Они содержат наборы показателей гигиенических условий труда; применяемую технику и технологии; показатели тяжести и напряженности труда; стиль и политики управления.

Как видим, решение задачи оценки текущего и прогнозирования будущего состояния трудового потенциала связано с необходимостью учета большого числа взаимосвязанных факторов, выявления закономерностей его изменения, определения влияния на него управляющих воздействий, снижения вычислительной сложности самой задачи. Из-за сложностей формализации трудового потенциала традиционными подходами существенно ограничены возможности по созданию эффективных методов, алгоритмов оценки, прогнозирования и управления им. Перспективным методом выступает применение искусственных нейронных сетей. Применительно к трудовому потенциалу рыбохозяйственного комплекса уже имеется некоторый задел по разработке

специальных методов кодирования исходных данных о трудовом потенциале, обеспечению обработки их нейронными сетями и применения специальных методов обучения этих сетей [1,2].

В данной работе представлен подход к прогнозированию, в основе которого лежит метод обработки временных рядов трудового потенциала и связанных с ним управляющих воздействий интеллектуальным ядром, состоящим из двух одинаковых рекуррентных нейронных сетей.

1. Оценка характеристик экипажа и условий труда

Несмотря на высокую значимость и сложность труда в море довольно мало исследований, посвященных роли человеческого фактора в эффективности и (или) результативности промышленного рыболовства.

В основном рассматриваются проблемы несчастных случаев, травм, потерь людей и имущества, связанных с человеческим фактором и ошибками в морской деятельности [3-5].

Работы, посвященные качеству человеческих ресурсов в промышленном рыболовстве, немногочисленны и содержат, в основном, анализ отдельных свойств и факторов, таких как здоровье [6]; поведенческие факторы риска [7]; обеспеченность трудовыми ресурсами [8]; проблема мультикультурных экипажей [9].

Вместе с тем, следует отметить, что внимание исследователей к разработке систем поддержки принятия решений в морской деятельности, включая рыболовство, растет [10-12].

Заметим, что накоплен положительный исследовательский опыт использования рекуррентных нейронных сетей в анализе и управлении человеческими ресурсами [13-16].

Исходными данными и средствами при реализации предлагаемого метода нейросетевого прогнозирования выступают:

- рекуррентная нейронная сеть с управляемыми элементами;
- временные ряды, характеризующие характеристики для выделенных возрастных групп работников;
- временной ряд условий проявления трудовых потенциалов, привязанный их временным рядам;
- конечное множество возможных условий проявления трудовых потенциалов;
- средства кодирования исходных данных и декодирования результатов прогнозирования;
- требования к горизонту прогноза;
- требования к точности прогноза с учетом горизонта прогнозирования.

Для формирования базы первичных данных используются результаты структурированного опроса и обследования с помощью тестирования (BFI-2, Motype, опросник Шварца), данные кадровых служб и промысловой статистики. Опрос и обследование проводятся с помощью платформы ТП РХК программного обеспечения «Система управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса».¹

¹ Свидетельство о государственной регистрации регистрации программы для ЭВМ 2023617701

Следует отметить, что реализация мониторинга характеристик экипажей рыболовных судов и условий труда в интересах прогнозирования возможных событий должна осуществляться с такой периодичностью, при которой ошибки, связанные с пропуском возможных событий, не будут превышать заданных значений. Учитывая инерционность изменения трудового потенциала в зависимости от различных факторов, рекомендуемая частота сбора и обработки данных не чаще одного раза в год.

В результате такого сбора должны формироваться многомерные ряды, которые могут представляться в виде последовательных наборов числовых матриц, отражающих как состояния характеристик работников, так и условий труда, рис. 1. Элементы этих матриц могут принимать значения существенно больше единицы.

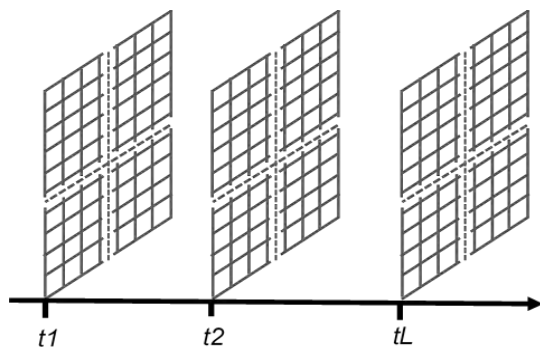


Рис. 1. Последовательность числовых матриц, отражающих состояния ТП на фиксированные моменты времени

При планировании использования импульсных нейронных сетей для прогнозирования трудового потенциала, оценки результативности и принятия решений эти матрицы должны быть приведены к булевому виду.

Согласно предлагаемому методу, предусматривается многократное прогнозирование трудовых потенциалов на одних и тех же априорных данных для выделенных возрастных групп. Сначала в каждом конкретном случае обнуляют нейронную сеть. Затем осуществляют прогон через нее анализируемого ряда при пониженном уровне ассоциативного вызова сигналов из памяти. Снова осуществляют ввод этого ряда в сеть с дополнением его на будущие моменты модельного времени данными о планируемых условиях проявления трудового потенциала (закодированной информацией о конкретных наборах признаков и мероприятий). После завершения ввода в сеть этих данных, усиливают ассоциативный вызов сигналов из памяти в направлении входа сети и осуществляют прогнозирование. В результате получают прогнозы трудового потенциала для заданных условий его проявления. Декодируют результаты и оценивают спрогнозированный трудовой потенциал по всем возрастным группам и будущим моментам. Запоминают результат оценки и привязанные к нему условия проявления. Аналогичным образом поступаем для других закодированных наборов признаков и мероприятий. Затем определяем набор, который обеспечит достижение наибольшего значения трудового потенциала в будущем. После этого управление трудовым потенциалом экипажа

сводится к реализации мероприятий из найденного набора. Затем цикл повторяется.

2. Методы нейроуправления и требования к перспективным системам

В некоторой мере для управления трудовым потенциалом применимы известные методы нейроуправления [17,18]. Выделяют подражающее, инверсное, прогнозирующее, многомодульное, гибридное, вспомогательное и другие виды нейроуправления. Применительно к трудовому потенциалу (ТП) обратим внимание на ряд методов такого управления. Суть идеи подражающего нейроуправления поясним на примере схемы (рис. 2).

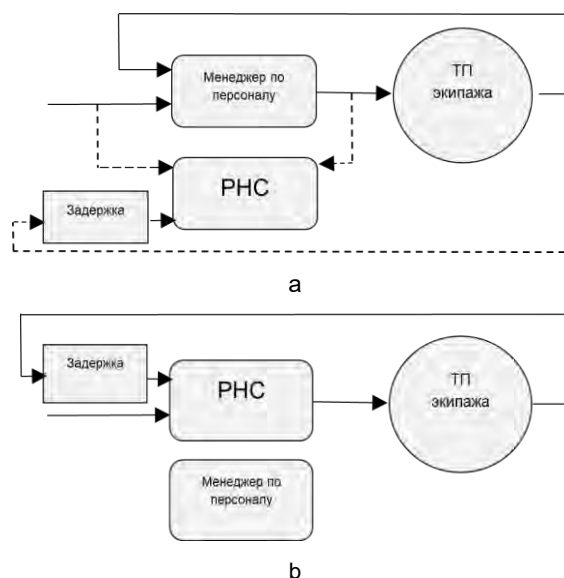


Рис. 2. Схема подражающего нейроуправления: а – при обучении; б – при управлении

Нейронная сеть обучается с учителем на работе обычного менеджера, отвечающего за персонал. Она подражает его действиям. При обучении на нейронную сеть подают информацию с выхода объекта управления и о входных управляющих воздействиях. Обучение возможно с применением метода обратного распространения ошибки и других. В результате обучения в нейронной сети формируется модель процесса управления в виде запомненных ассоциативных связей между входными и выходными воздействиями. Эта модель позволяет ставить в соответствие выходными сигналами с объекта управления целесообразные управляющие воздействия. Успешность такого управления во многом зависит от профессионализма моделируемого менеджера, эффективности его работы. Заметим, что полученная модель не может обеспечить эффективность управления лучше, чем у менеджера. При этом возникают трудности получения от менеджера всей информации, которую он использует для выработки управляющих решений.

При инверсном нейроуправлении нейронная сеть обучается на поведении объекта управления при подаче на него случайного процесса.

Затем обученная нейронная сеть используется в качестве системы управления. Различают инверсное обобщенное и специализированное

нейроуправление, а также метод обратного пропуска ошибки через прямой нейроэмулятор.

При прогнозирующем нейроуправлении минимизируется ошибка между эталонным и текущим состоянием объекта. Этот метод обеспечивает наилучшее интегральное управление. Различают прогнозирующее модельное нейроуправление и методы нейроуправления на основе адаптивной критики. Схема прогнозирующего модельного нейроуправления включает прямой нейроэмулятор и оптимизационный алгоритм, который используется вместо обучаемого нейроконтроллера (рис. 3).

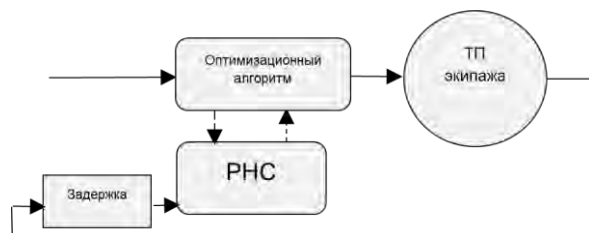


Рис. 3. Схема прогнозирующего нейроуправления

К ограничениям этого метода следует отнести затраты времени на получение прогнозов. В методах нейроуправления на основе адаптивной критики формируется управляющий сигнал на основе оценок ошибок будущего с бесконечным горизонтом. В нашем случае наиболее близким аналогом применительно к перспективной нейросетевой системе управления выступает система прогнозирующего нейроуправления. Принимая во внимание относительно инерционные процессы изменения свойств трудового потенциала плавсостава и управляющих воздействий на него, временем на выработку прогнозов можно пренебречь.

3. Описание модели прогнозирования трудового потенциала

В основе модели лежит интеллектуальное ядро, состоящее из двух одинаковых рекуррентных нейронных сетей (РНС 1, 2) с управляемыми элементами и блок управления ими.

Информация о характеристиках членов экипажей судов и условиях труда перед вводом в РНС 1, 2 подвергается предварительной обработке и кодированию. При предварительной обработке учитываются сведения из базы данных свойств трудового потенциала. В результате кодирования формируются последовательные совокупности единичных импульсов (СЕИ), несущих все сведения о текущем состоянии трудового потенциала. Возможен следующий вариант работы интеллектуального ядра. Согласно ему одна из РНС непрерывно обучается, а вторая нейронная сеть используется для решения творческих задач по командам от блока управления сетью. Рассмотрим случай, когда РНС 1 непрерывно обучается. Совокупности единичных импульсов (СЕИ) непрерывно воспринимаются РНС 1, а РНС 2 получает их только по командам от блока

управления. При поступлении СЕИ в РНС 1 они продвигаются вдоль слоев за счет реализованных пространственных сдвигов, связываются друг с другом и с ранее запомненной информацией на элементах сети. В результате в РНС 1 формируется постоянно обновляемая модель трудового потенциала и результативности экипажа рыбопромыслового судна (флота). При решении основных творческих задач блок управления считывает информацию о состоянии нейронов и синапсов с РНС 1 и обрабатывает ее с помощью РНС 2. Таким образом, при решении основной задачи управления трудовым потенциалом после считывания информации о состоянии элементов РНС 1 выполняются следующие действия. Информация о состояниях нейронов РНС 1, несущих информацию об обрабатываемых временных рядах, дополняется в блоке управления одним из альтернативных будущих управлений. Затем она загружается в РНС 2 и сеть переводится в режим ускоренного предсказания будущих состояний трудового потенциала. Полученные результаты прогнозирования считываются из РНС 2 в блок управления, где оцениваются по одному из полученных показателей и сохраняются вместе с вариантом управления. Затем внутренний цикл повторяется с альтернативным управлением. В результате из конечного множества оцениваемых вариантов управления выбирается наилучший, обеспечивающий экстремум принятого показателя результативности. Этот вариант управления передается через РНС 2 на декодер, а затем на эффекторы и блок кодирования. После воздействия на объект управления и считывания с него информации цикл управления повторяется. Однако в этом случае система может решать множество других творческих задач по обработке временных рядов о трудовом потенциале, управляя РНС 1, 2.

С формальной точки зрения обработку временных рядов трудового потенциала и связанных с ним управляющих воздействий можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 4, где приняты обозначения SSP^c, SSP^a - последовательные совокупности единичных импульсов, соответствующие временным рядам управляющих воздействий и трудовому потенциалу, которые ассоциативно связываются в РНС1. Информация о связях этих последовательных совокупностей единичных образов и о них самих переносится в РНС2. Также совокупности SSP^c дополняются одним из альтернативных вариантов, $SSP_1^{c_j}; SSP_2^{c_j}; \dots; SSP_i^{c_j}$, будущих управляющих воздействий на трудовой потенциал предприятия. На начало формирования в РНС 2 прогнозов трудового потенциала ее состояние характеризуется в виде

$$\left\{ SSP_1^{c_j}; SSP_2^{c_j}; \dots; SSP_i^{c_j}, SSP_{i+1}^c, SSP_{i+2}^c, \dots, SSP_n^c \right\}. \quad (1)$$

Каждый единичный импульс в нейронной сети сопоставляется с нейроном в состоянии возбуждения.

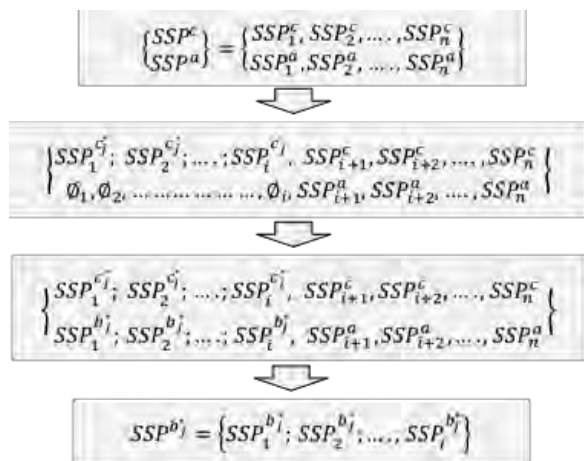


Рис. 4. Схема обработки временных рядов трудового потенциала

Заметим, что символы пустых множеств на рис. 4 $\emptyset_1, \emptyset_2, \dots, \emptyset_i$ обозначают пустые (нулевые) совокупности, которые в результате работы РНС 2 преобразуются в совокупности, отражающие прогнозы трудового потенциала $SSP_1^b; SSP_2^b; \dots; SSP_i^b$ при рассматриваемом управлении результативностью.

Перебирая альтернативные варианты управления трудовым потенциалом, синтезируя и оценивая для них результаты прогнозов, можно находить целесообразные решения.

С учетом используемого метода по формированию временных рядов трудового потенциала, управляющих воздействий и результативности судна (флота) можно сузить при поиске целесообразных управлений только на работе интеллектуального ядра.

4. Результаты нейросетевого прогнозирования

В простом случае в качестве исходных данных могут выступать суммарные трудовые потенциалы выделенных возрастных групп на фиксированные моменты времени. Для этого случая вместо последовательности числовых матриц (рис. 2), отражающих состояния трудового потенциала и условий труда на фиксированные моменты времени, можно оперировать последовательностью векторов столбцов (рис. 5).



Рис. 5. Последовательность векторов столбцов, несущих информацию о ТП и условиях его реализации на фиксированные моменты времени

Аналогичным образом можно представлять не только суммарные потенциалы, но и потенциалы по отдельным должностям или направлениям морской

деятельности. В общем случае необходимо оперировать последовательностями матриц (рис. 1).

Для того, чтобы перейти от натуральных чисел в векторах столбцов, несущих информацию о трудовых потенциалах и условиях их проявления, к булевой форме можно преобразовать эти вектора в матрицы нулей и единиц (рис. 6).



Рис. 6. Вариант представления значений ТП в виде булевых матриц

При необходимости обработки больших чисел, характеризующих трудовой потенциал и условия его проявления, со сниженной нагрузкой на нейронную сеть, вместо варианта на рис. 6 применим вариант на рис. 7.



Рис. 7. Пример разреженного кодирования значений ТП и условий их проявления в виде последовательностей пар булевых матриц

Заметим, что представление больших чисел в обычной двоичной форме для обработки в нейронных сетях не всегда желательно из-за невысокой различимости этих представлений. На рис. 7 t_1, t_2 – моменты времени, на которые задаются исходные данные; n_1, n_2, n_3, n_4 – номера тактов ввода в сеть исходных данных.

С учетом таких преобразований была разработана программная модель рекуррентной нейронной сети. Число нейронов в каждом слое этой нейронной сети равно 1890 единиц. Каждый слой за счет реализуемых пространственных сдвигов совокупностей единичных образов, передаваемых от слоя к слою, разбивался на 45 логических полей с размерами $6 \times 7 = 42$ нейрона [19]. Совокупности единичных образов продвигались вдоль слоев по петлевой схеме (РНС с петлевой схемой продвижения сигналов вдоль слоев). Входные данные в виде рис. 6 подавались на первое поле первого слоя нейронной сети. При обработке в сети они продвигались по заданному маршруту и ассоциировались друг с другом.

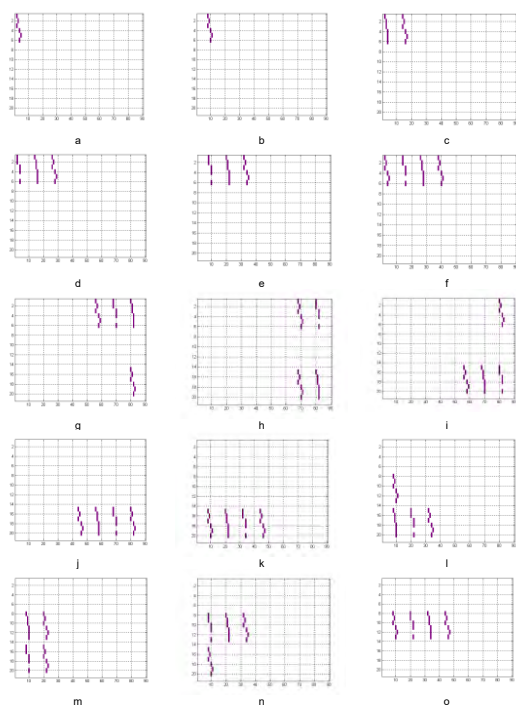


Рис. 8. Примеры состояний первого слоя рекуррентной нейронной сети при продвижении входных сигналов вдоль слоев по петлевой схеме

В результате таких ассоциаций в нейронной сети устанавливались и запоминались объективные пространственно-временные связи между сигналами, несущими информацию о трудовых потенциалах и об условиях их проявления. При прогнозировании трудовых потенциалов после введения в нейронную сеть информации об известных временных рядах осуществлялось усиление ассоциативного вызова сигналов из памяти в направлении входа нейронной сети, в результате которого сеть формировала интересующий нас прогноз. При этом предусматривалась возможность прогнозирования трудовых потенциалов с заданием планируемых условий их проявления. Это позволяло определять целесообразные условия проявления трудового потенциала, находить интересующие управляющие воздействия по реализации этих условий. На рис. 8 показаны состояния первого слоя рекуррентной нейронной сети при формировании в ней модели входных сигналов: $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow o$.

Согласно рис. 8 и схемы кодирования, аналогичной рис. 6, в сеть последовательно вводились четыре совокупности единичных образов, несущие информацию о трудовых потенциалах и условиях их проявления на фиксированные моменты времени. При пониженном уровне ассоциативного вызова сигналов из памяти сети входные сигналы

проходили по ней, оставляя след о своем пребывании в виде изменения весов синапсов. Пример прогнозирования трудовых потенциалов и условий их проявления на основе воспринятых нейронной сетью входных данных приведен на рис. 9.

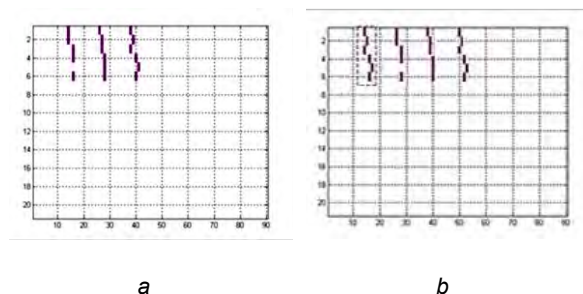


Рис. 9. Состояния первого слоя рекуррентной нейронной сети, отражающие пример извлечения из памяти будущих событий:

a – состояние до выдачи прогноза; b – состояние после очередного пространственного сдвига совокупности единичных образов вдоль слоев с вызванными результатами прогноза, выделенными штриховыми линиями

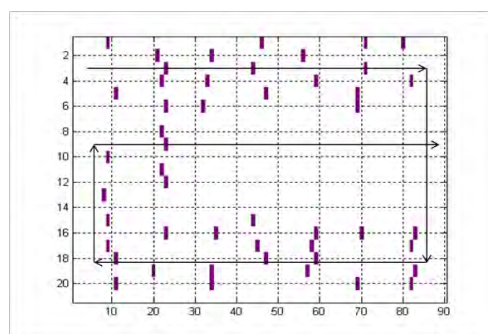
Заметим, что все обработанные в нейронной сети совокупности единичных образов могут быть преобразованы обратно в исходные сигналы.

Исследовалось также прогнозирование со схемой кодирования, аналогичной рис. 7.

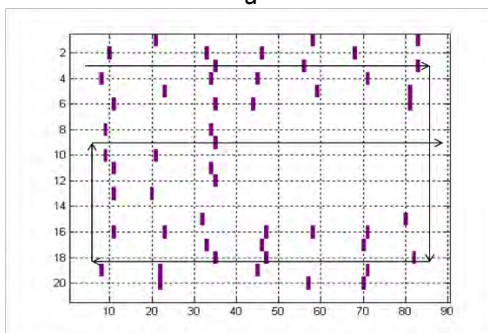
В качестве обучающих временных рядов, характеризующих трудовые потенциалы и условия их проявления в условных единицах, выступала последовательность векторов столбцов $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{12}\}$:

$$\begin{aligned} X_1 = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}; X_2 = \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}; X_3 = \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix}; X_4 = \begin{bmatrix} 4 \\ 7 \\ 3 \\ 4 \\ 2 \\ 6 \end{bmatrix}; X_5 = \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 7 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix}; X_6 = \begin{bmatrix} 4 \\ 5 \\ 4 \\ 8 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix}; \\ X_7 = \begin{bmatrix} 3 \\ 7 \\ 5 \\ 6 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}; X_8 = \begin{bmatrix} 6 \\ 2 \\ 4 \\ 3 \\ 8 \\ 4 \end{bmatrix}; X_9 = \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 8 \\ 3 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}; X_{10} = \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 4 \\ 7 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix}; X_{11} = \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 4 \\ 7 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}; X_{12} = \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 5 \\ 8 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}. \quad (2) \end{aligned}$$

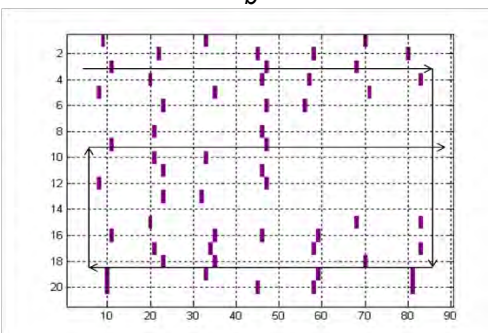
Каждый вектор столбец имел структуру согласно рис. 5. Первые пять элементов в каждом векторе столбце несут информацию о трудовых потенциалах выделенных возрастных групп. Последний элемент отражает условия проявления потенциалов. При этом выделялись пять возрастных групп трудовых ресурсов. Эти временные ряды обрабатывались в той же самой нейронной сети, как и в первом случае. Примеры состояний первого слоя рекуррентной нейронной сети при обучении показаны на рис. 10.



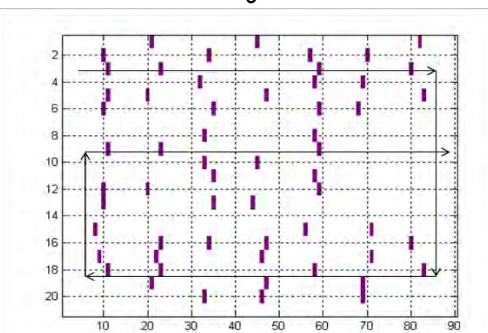
a



b



c

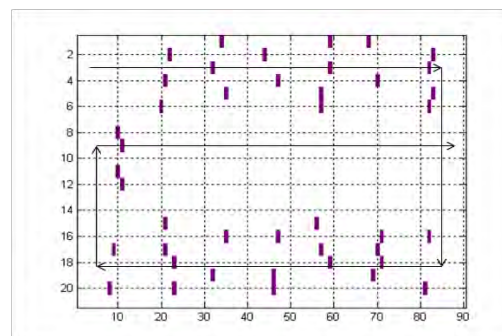


d

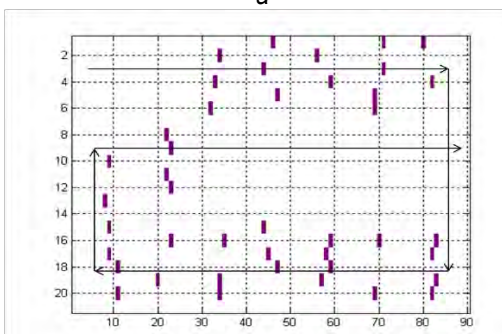
Рис. 10. Состояний первого слоя рекуррентной нейронной сети при обучении

Сплошными стрелками на рис. 10 отражены направления продвижения совокупностей единичных образов вдоль слоев. Результаты прогнозирования после такого обучения показаны на рис. 11. Согласно этому рисунку, состояние b следует после состояния a. Состояние c уже с частичными результатами прогноза (обведены штрихпунктирными линиями) формируется из состояния b при усилении ассоциативного вызова сигналов из памяти в направлении входа сети [20].

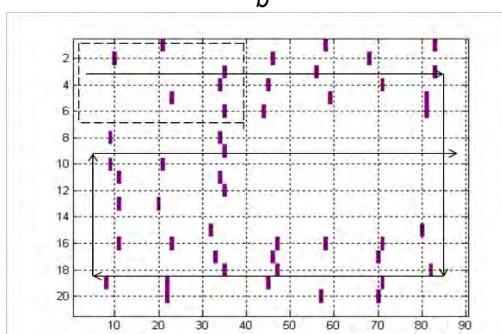
При дальнейшем вызове сигналов из памяти сети на очередном шаге формируется состояние d с дополненными результатами прогноза (обведены на рис. 11d штрихпунктирными линиями).



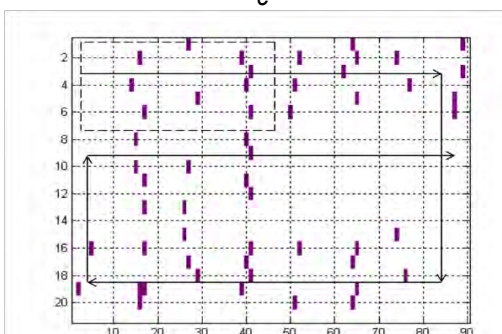
a



b



c



d

Рис. 11. Результаты нейросетевого прогнозирования

После декодирования этих результатов имеем прогнозные значения для трудовых потенциалов выделенных возрастных групп и номера условий их проявления

$$X^{1*} = \begin{bmatrix} 6 \\ 2 \\ 4 \\ 3 \\ 8 \\ 4 \end{bmatrix}; X^{2*} = \begin{bmatrix} 3 \\ 8 \\ 3 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В данном примере результаты прогнозирования совпадают с ранее воспринятыми примерами. Особенности такого прогнозирования выступают широкие возможности по учету перекрестных связей между трудовыми потенциалами возрастных групп в различные моменты времени и условиями проявления трудового потенциала. Согласно рассмотренному методу, не требуется формирование аналитических моделей временных рядов трудового потенциала. Динамические модели этих рядов формируются в самой рекуррентной нейронной сети при восприятии ею не только данных об этих рядах, но и условиях проявления.

Заключение

Анализ и обзор научных работ, посвященных оценке и управлению результативностью экипажей рыбопромысловых судов, показал, что, в основном, оценивается производительность, продуктивность. Исследования значения человеческого ресурса как возможности достижения определенной результативности практически отсутствуют.

Концепция трудового потенциала позволяет выйти на принципиально новый уровень мониторинга и управления результативностью промышленного рыболовства.

Решение задачи прогнозирования состояния трудового потенциала требует учета множества разноплановых факторов и их сложного взаимодействия.

Представленный подход позволяет выявить закономерности изменения трудового потенциала экипажа, установить характер и силу влияния на него тех или иных управляющих воздействий, при этом снизив вычислительную сложность задачи.

Эффективность мониторинга характеристик экипажей рыбопромысловых судов и условий труда обеспечивается достаточно невысокой периодичностью сбора данных.

Построение зависимостей характеристик трудового потенциала от возрастных интервалов позволяет осуществлять прогнозирование низкочастотным способом.

Нейросетевая модель обеспечивает возможность прогнозирования состояний трудового потенциала применительно к отдельному работнику, экипажу судна, всему плавсоставу, позволяет учитывать взаимодействие трудовых потенциалом разного масштаба, позволяет выходить на вероятность выполнения целевых показателей – оценку результативности.

Литература

1. Огий О.Г., Осипов В.Ю., Тристанов А.Б., Жукова Н.А. Процесс управления трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса как объект моделирования. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53), С. 255-261. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.030>.
2. Ogiy O.G., Osipov V. A. Compositional Approach to Labor Potential Evaluation and a Neural Network Model for Its Forecasting. Ecosystems Without Borders. EcoSystConfKlgtu 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 705. Springer, Cham, pp 140-153 https://doi.org/10.1007/978-3-031-34329-2_15.
3. Gbasibo L. The Input of Human errors as constituents to Marine Accidents in the Niger Delta, Nigeria. A Quantitative Approach. International Journal of Social Sciences and Management Research. 2023. 8. 154-165, Pp. 154-165 <https://doi.org/10.56201/ijssmr.v8.no3.2022>.
4. Jenkins D. Delivering Behavioural Change. Offshore Technology Conference. Houston. Texas, May 2003. <https://doi.org/10.4043/15217-MS>.
5. Cutler M., Silva A., Gentile L., Colburn L. Tracking shifts in the vulnerability and resiliency of commercial fishing vessel crew and hired captains in New England and the Mid-Atlantic. Marine Policy. 2022. 138, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104980>.
6. Lupachev V., Koubassov R., Popov V., Demin D., Kubasova E. The structure of morbidity of fishermen working in different geographical regions. Marine Medicine. 2023. No 8, pp. 44-51. <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-4-44-51>.
7. Speir C., Ridings C., Marcum J., Drexler M., Norman K. Measuring health conditions and behaviours in fishing industry participants and fishing communities using the Behavioral Risk Factor Surveillance Survey (BRFSS). ICES Journal of Marine Science. 2020. Vol. 77, pp. 1830-1840. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa032>.
8. Тропникова Н.Л. Обеспеченность квалифицированными кадрами предприятий морского промышленного рыболовства как резерв развития арктических регионов. Управление в современных системах. 2020. №2(26), С.55-62.
9. Kondratiev A.I., Smirnov I.O. On cross cultural communication in a mixed crew. Journal of Maritime Research. 2015. 12. pp. 65-68.
10. J. Melbourne-Thomas et al. Integrated modelling to support decision-making for marine social-ecological systems in Australia ICES Journal of Marine Science. 2017. vol. 74, no. 9, pp. 2298–2308, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx078>.
11. Hobday A. J., Spillman C. M., Paige Eveson J., R. Hartog J. Seasonal forecasting for decision support in marine fisheries and aquaculture. Fisheries Oceanography. 2016. vol. 25, pp. 45–56. <https://doi.org/10.1111/fog.12083>.
12. Stephenson R. L. et al. A practical framework for implementing and evaluating integrated management of marine activities. Ocean and Coastal Management. 2019. vol. 177, pp. 127–138, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman..04.008>.
13. Fang R., Fang Z. Analysis of Human Resource Allocation Scheme for Digital Media Big Data Based on Recurrent Neural Network Model. Journal of Sensors. 2022, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/3430933>.

14. Rajagopal, N. K., Saini, M., Huerta-Soto, R., Vilchez-Vásquez, R., Kumar, J. N. V. R. S., Gupta, S. K., Perumal, S. Human Resource Demand Prediction and Configuration Model Based on Grey Wolf Optimization and Recurrent Neural Network. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/5613407>.
15. Sanchez-Caballero A., Fuentes-Jimenez D., Losada-Gutiérrez C. Real-time human action recognition using raw depth video-based recurrent neural networks. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. 82, pp. 16213-16235. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14075-5>.
16. Song Y., Zhang S., Tang F., Shi Y., Wu Y., He J., Chen Y., Li L.n. Behavior Recognition of Squid Fishing Vessel Crew Based on Deep Learning. *Fishes*. 2023. 8. 502. <https://doi.org/10.3390/fishes8100502>.
17. Чернодуб А.Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейрорегуляции. Проблемы программирования. 2011. №2, С. 79 – 94.
18. Vassileva S., Kozak S. NN model-based predictive control. *IFAC Control Systems Design*. Bratislava. Slovak Republic. 2020, pp. 495-500.
19. Осипов В.Ю. Ассоциативная интеллектуальная машина. Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. №2. с. 59-67.
20. Osipov V., Nikiforov V., Zhukova N., Miloserdov D. Urban traffic flows forecasting by recurrent neural networks with spiral structures of layers // *Neural Computing and Applications*. 2020. No 32. pp. 14885-14897. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04843-5>

References

1. Ogiy O.G., Osipov V.Yu., Tristanov A.B., Zhukova N.A. Process of Management of Labor Potential of the Fishery Complex as an Object of Modeling. *Marine Intelligent Technology*. 2021. № 3-1(53), С. 255-261. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.53.3.030>.
2. Ogiy O.G., Osipov V. A. Compositional Approach to Labor Potential Evaluation and a Neural Network Model for Its Forecasting. *Ecosystems Without Borders. EcoSystConfKlgtu 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 705. Springer, Cham, pp 140-153 https://doi.org/10.1007/978-3-031-34329-2_15.
3. Gbasibo L. The Input of Human errors as constituents to Marine Accidents in the Niger Delta, Nigeria. A Quantitative Approach. *International Journal of Social Sciences and Management Research*. 2023. 8. 154-165, Pp. 154-165 <https://doi.org/10.56201/ijssmr.v8.no3.2022>.
4. Jenkins D. Delivering Behavioural Change. *Offshore Technology Conference*. Houston. Texas, May 2003. <https://doi.org/10.4043/15217-MS>.
5. Cutler M., Silva A., Gentile L., Colburn L. Tracking shifts in the vulnerability and resiliency of commercial fishing vessel crew and hired captains in New England and the Mid-Atlantic. *Marine Policy*. 2022. 138, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104980>.
6. Lupachev V., Koubassov R., Popov V., Demin D., Kubasova E. The structure of morbidity of fishermen working in different geographical regions. *Marine Medicine*. 2023. No 8, pp. 44-51. <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-4-44-51>.
7. Speir C., Ridings C., Marcum J., Drexler M., Norman K. Measuring health conditions and behaviours in fishing industry participants and fishing communities using the Behavioral Risk Factor Surveillance Survey (BRFSS). *ICES Journal of Marine Science*. 2020. Vol. 77, pp. 1830-1840. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa032>.
8. Tropnikova N.L. Provision of Qualified Personnel of Marine Industrial Fishing Enterprises as a Reserve for the Development of Arctic Regions. *Management in modern systems*. 2020. №2(26), С.55-62.
9. Kondratiev A.I., Smirnov I.O. On cross cultural communication in a mixed crew. *Journal of Maritime Research*. 2015. 12. pp. 65-68.
10. J. Melbourne-Thomas et al. Integrated modelling to support decision-making for marine social-ecological systems in Australia *ICES Journal of Marine Science*. 2017. vol. 74, no. 9, pp. 2298–2308, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx078>.
11. Hobday A. J., Spillman C. M., Paige Eveson J., R. Hartog J. Seasonal forecasting for decision support in marine fisheries and aquaculture. *Fisheries Oceanography*. 2016. vol. 25, pp. 45–56. <https://doi.org/10.1111/fog.12083>.
12. Stephenson R. L. et al. A practical framework for implementing and evaluating integrated management of marine activities. *Ocean and Coastal Management*. 2019. vol. 177, pp. 127–138, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.04.008>.
13. Fang R., Fang Z. Analysis of Human Resource Allocation Scheme for Digital Media Big Data Based on Recurrent Neural Network Model. *Journal of Sensors*. 2022, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/3430933>.
14. Rajagopal, N. K., Saini, M., Huerta-Soto, R., Vilchez-Vásquez, R., Kumar, J. N. V. R. S., Gupta, S. K., Perumal, S. Human Resource Demand Prediction and Configuration Model Based on Grey Wolf Optimization and Recurrent Neural Network. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/5613407>.
15. Sanchez-Caballero A., Fuentes-Jimenez D., Losada-Gutiérrez C. Real-time human action recognition using raw depth video-based recurrent neural networks. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. 82, pp. 16213-16235. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14075-5>.
16. Song Y., Zhang S., Tang F., Shi Y., Wu Y., He J., Chen Y., Li L.n. Behavior Recognition of Squid Fishing Vessel Crew Based on Deep Learning. *Fishes*. 2023. 8. 502. <https://doi.org/10.3390/fishes8100502>.
17. Chernodub A.N., Dzyuba D. A. Review of Neurocontrol Methods. *Programming Challenges*. 2011. №2, С. 79 – 94.
18. Vassileva S., Kozak S. NN model-based predictive control. *IFAC Control Systems Design*. Bratislava. Slovak Republic. 2020, pp. 495-500.
19. Osipov V.Y. Associative Intelligent Machine. *Information Technology and Computing Systems*. 2010. №2. с. 59-67.

20. Osipov V., Nikiforov V., Zhukova N., Miloserdov D. Urban traffic flows forecasting by recurrent neural networks with spiral structures of layers // Neural Computing and Applications. 2020. No 32. pp. 14885-14897. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04843-5>

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Огий Оксана Геннадьевна, кандидат социологических наук, доцент, первый проректор, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236022, Россия, г. Калининград, Советский пр., 1, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru

Oksana G. Ogij, Ph.D. (Soc), Assistant Professor, First Vice-Rector, Kaliningrad State Technical University, Sovietsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russia, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru

Осипов Василий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, и.о. директора СПИИРАН СПб ФИЦ РАН, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, дом 39, e-mail: osipov.v@iias.spb.su

Vasiliy Y. Osipov, Dr.Sci. (Eng), Professor; Director SPIIRAS St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14-th Linia, VI, No. 39, St. Petersburg, 199178, Russia, e-mail: osipov.v@iias.spb.su

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 23.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 09.11.2023.

Научная статья

УДК 62-50

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.027>

Принцип синтеза управляющих воздействий при неизменяемом возмущении с использованием наблюдателей состояния

Лубенцов В.Ф.¹ vf.lubentsov@yandex.ru, Лужевский Н.О.¹ nikitaluzhev97@gmail.com,Лубенцова Е.В.¹ elena-v-l@mail.ru, Лютикова М.Н.² mnlyutikova@mail.ru¹Кубанский государственный технологический университет, ²Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация: В статье рассмотрен синтез управления объектом на основе принципа восстановления переменных состояний и оценки неизменяемого возмущения с использованием асимптотического наблюдателя Луюнбергера минимальной размерности. Целью исследования является обоснование принципа синтеза управления путем анализа переходных процессов в системе с наблюдателем, функционирующей в условиях действия внешнего неизменяемого возмущения. Разработана структура системы автоматического управления, в которой для компенсации возмущающего воздействия предусмотрено дополнительное интегрирующее звено, реализующее оценку восстановленного наблюдателем возмущения. Получены переходные процессы на выходе объекта и наблюдателя в системе управления с оценкой производной в законе регулирования, восстановленной наблюдателем, продемонстрировавшие существенную зависимость показателей качества от возмущения. В связи с чем, был разработан алгоритм компенсации влияния внешнего возмущения на объект, имеющего наиболее тяжелый для регулирования ступенчатый вид. Синтезированный наблюдатель позволил дополнительно улучшить динамику системы управления при действии внешнего возмущающего воздействия.

Ключевые слова: наблюдатель состояния, неизменяемые возмущения, переходной процесс, система автоматического управления, синтез управляющих воздействий.

Для цитирования: Лубенцов В.Ф., Лужевский Н.О., Лубенцова Е.В., Лютикова М.Н. Принцип синтеза управляющих воздействий при неизменяемом возмущении с использованием наблюдателей состояния, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 224—231. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.027

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.027>

The principle of synthesis of control actions in immeasurable perturbation by means of observers

Valery F. Lubentsov¹ vf.lubentsov@yandex.ru, Nikita O. Luzhevsky¹ nikitaluzhev97@gmail.com,Elena V. Lubentsova¹ elena-v-l@mail.ru, Marina N. Lyutikova mnlyutikova@mail.ru¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation, ²Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. The article considers the synthesis of object control based on the principle of restoring variable states and estimating an immeasurable perturbation using an asymptotic Luenberger observer of minimal dimension. The aim of the study is to substantiate the principle of control synthesis by analyzing transients in a system with an observer operating under the action of an external immeasurable disturbance. The structure of the automatic control system has been developed, in which an additional integrating link is provided to compensate for the disturbing effect, which implements the evaluation of the disturbance restored by the observer. Transient processes at the output of the object and the observer in the control system with an estimate of the derivative in the law of regulation restored by the observer have been obtained, demonstrating a significant dependence of quality indicators on perturbation. In this connection, an algorithm has been developed to compensate for the influence of an external disturbance on an object that has the most difficult stepwise appearance for regulation. The synthesized observer made it additionally possible to improve the dynamics of the control system under the action of an external disturbing influence.

Keywords: state observer, immeasurable disturbances, transient process, automatic control system, synthesis of control actions.

For citation: Valery F. Lubentsov, Nikita O. Luzhevsky, Elena V. Lubentsova, Marina N. Lyutikova. The principle of synthesis of control actions in immeasurable perturbation by means of observers. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 224—231. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.027

Введение

Высокий уровень развития микропроцессорной техники в современном мире создает необходимые предпосылки для реализации в режиме реального времени процедуры вычисления неизменяемых переменных состояния в различных цифровых системах с помощью математических алгоритмов, реализуемых наблюдателями [1]. Это

предопределяет необходимость более качественного решения задачи управления сложными техническими объектами [2-3], судовыми установками, спускаемыми подводными аппаратами в условиях открытого моря, транспортными морскими объектами, технологическими агрегатами и др. Задача построения наблюдателей очень часто сталкивается с проблемами наличия в системах управления неизменяемого возмущения. На практике

возмущающие воздействия на объект управления в виде гармонических функций имеют место в системах управления надводными судами при описании процесса качки судна, при ветровом и волновом внешних возмущающих воздействиях, в системах виброзащиты, мониторинга параметров различного технического оборудования и т.п. [4]. Возмущающие воздействия в задаче синтеза законов управления колебаниями судна по углу крена или по углу дифферента могут оказывать волны, порывы ветра. Идентификация таких воздействий является очень важной и актуальной задачей, решение которой можно получить реализацией метода динамической компенсации возмущений.

Цель и задачи. Целью данной работы является исследование переходных процессов в системе управления с наблюдателем, функционирующей в условиях действия внешнего неизмеряемого возмущения наиболее тяжелого ступенчатого вида.

Достижение цели получено при решении задачи параметрического синтеза наблюдателя второго порядка, исходя из предположения, что внешнее возмущение постоянно и скорость его на интервале ожидаемого переходного процесса близка к нулю.

Постановка задачи оценки возмущения

В большинстве случаев системы автоматического управления (САУ) функционируют при действии внешних возмущений, которые не могут непосредственно измерены. В связи с этим, применение методов теории инвариантности для построения компенсаторов возмущений невозможно. В этом случае альтернативным вариантом компенсации возмущения является реализация дополнительного канала, формирующего оценку восстановленного с помощью наблюдателя возмущения. Для решения задачи оценки возмущения используются наблюдатели состояния объекта управления и модели внешнего возмущения. В данной статье обеспечивается получение оценок не только переменных состояния модели возмущения, но и переменных состояния объекта управления, недоступных прямым измерениям.

Рассмотрим объект управления, подверженный влиянию внешнего возмущения, который описывается в пространстве состояний уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -a_1x_1 - a_2x_2 + bU(t - \tau) + F(t); \\ \dot{F}(t) = 0; \end{cases} \quad (1)$$

где x_1, x_2 – переменные состояния объекта; $y = x_1$ – выходная координата объекта, доступная для наблюдения; τ – запаздывание; a_1, a_2, b – параметры объекта, определяющие динамику объекта и принимающие любые значения из ограниченного диапазона: $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}, a_{1\min} \leq a_1 \leq a_{1\max}, a_{2\min} \leq a_2 \leq a_{2\max}, b_{\min} \leq b \leq b_{\max}, U(t)$ – управляющее воздействие, $F(t)$ – возмущающее воздействие, $F(t) = \text{const}$.

Необходимо синтезировать наблюдатель, который по измерениям входа $U(t)$ и выхода $y(t)$ объекта управления формирует оценку возмущения $\hat{F}(t)$, обеспечивая выполнение условий

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \|F(t) - \hat{F}(t)\| &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|y(t) - \hat{x}(t)\| &= 0, \end{aligned}$$

и реализацию управления в виде:

$$U(t) = U_x(t) + U_F(t),$$

где $U_x(t)$ – управляющее воздействие, определяющее переходные процессы в системе при $F(t) = 0$; $U_F(t)$ – воздействие, компенсирующее влияние $F(t)$ на систему.

Поскольку переменные состояния объекта управления недоступны непосредственному измерению, необходимо решать задачу одновременной оценки переменных состояния объекта управления и внешнего возмущения с помощью наблюдателя.

Материалы и методы

Известны различные методы для оценивания состояний динамических систем управления. В данной работе рассмотрено использование асимптотического наблюдателя Люенбергера минимальной размерности для решения задачи приближенной компенсации или максимального ослабления влияния возмущения на САУ. Асимптотический наблюдатель Люенбергера минимальной размерности позволяет достичь очень высокой скорости сходимости оценки к действительному состоянию системы при отсутствии запаздывания. Однако недостаток типовой структуры наблюдателя существенно проявляется при отсутствии на его входе неизмеряемого внешнего возмущения, действующего на объект. При измерении возмущения его компенсация возможна с использованием компенсирующего устройства. Однако при наличии инерционностей в канале действия возмущения даже в этом случае для физической реализации компенсатора необходимы производные порядка более высокого, чем первый. Реализация такого устройства для динамических систем в общем случае требует производных степени N_i , где N_i – разность степеней полиномов знаменателя n и числителя m в выражении оператора инерционной части звена возмущения. При $n > m$ компенсирующее устройство физически не реализуемо. При $n = m$ использование дифференциаторов при наличии в измеряемом сигнале помех усиливает погрешность получаемых оценок состояния. Поэтому в данной работе рассмотрено использование в качестве информационных устройств наблюдателей состояния, позволяющих в каждый момент времени по наблюдениям входа и выхода системы давать текущую оценку ее действительного состояния и использование оценок переменных состояний для реализации производных при построении САУ [5-8].

При наличии запаздывания точная реализация компенсирующего устройства физически нереализуема. Причем, если запаздывание существенно, то приближенная аппроксимация его инерционными звеньями часто является неэффективной. В этом случае, использование асимптотического наблюдателя Люенбергера минимальной размерности позволит решить задачу приближенной компенсации или максимального ослабления влияния возмущения на систему.

Наиболее полная информация об оцениваемом процессе содержится в его динамической модели, поэтому широкое распространение получили методы оценивания, основанные на использовании

дифференциальных уравнений, описывающих объект. Воспользуемся дифференциальными уравнениями объекта для построения наблюдателя [9].

Рассмотрим задачу построения наблюдателя для системы управления объектом второго порядка с запаздыванием. Предположив, что внешнее возмущение $F(t) = \text{const}$ и скорость его на интервале ожидаемого переходного процесса равна нулю, для восстановления возмущения к уравнениям наблюдателя переменных состояния объекта необходимо добавить уравнение $\dot{\hat{F}} = l_3(y - \hat{x}_1)$ [10]. Для построения оценок $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{F}(t)$ величин $x_1, x_2, F(t)$ соответственно по наблюдениям $U(t)$ и $y(t)$ наблюдатель состояния описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + l_1(y - \hat{x}_1), \\ \dot{\hat{x}}_2 = -a_1\hat{x}_1 - a_2\hat{x}_2 + bU(t - \tau) + \hat{F}(t) + l_2(y - \hat{x}_1), \\ \dot{\hat{F}} = l_3(y - \hat{x}_1), \end{cases} \quad (2)$$

где $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{F}(t)$ – оценки величин $x_1, x_2, F(t)$ соответственно; l_1, l_2, l_3 – постоянные коэффициенты.

Запишем систему уравнений для ошибок идентификации переменных состояния системы (1) наблюдателем (2):

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - l_1(y - \hat{x}_1), \\ \dot{e}_2 = -a_1e_1 - a_2e_2 + e_3 - l_2(y - \hat{x}_1), \\ \dot{e}_3 = -l_3(y - \hat{x}_1), \end{cases} \quad (3)$$

где $e_1 = x_1 - \hat{x}_1, e_2 = x_2 - \hat{x}_2, e_3 = F(t) - \hat{F}(t)$ – отклонения переменных $x_1, x_2, F(t)$ от их оценок $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{F}(t)$ соответственно.

Система уравнений (3) в матричной форме имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 & 1 & 0 \\ -a_1 - l_2 & -a_2 & 1 \\ -l_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение системы (4) равно

$$\begin{vmatrix} -l_1 - \lambda & 1 & 0 \\ -a_1 - l_2 & -a_2 - \lambda & 1 \\ -l_3 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (5)$$

Вычисление характеристического многочлена матрицы (5) дает:

$$D(\lambda) = \lambda^3 + (a_2 + l_1)\lambda^2 + (a_2l_1 + a_1 + l_2)\lambda + l_3 = 0. \quad (6)$$

Назначая корни этого многочлена, можно рассчитать соответствующие этим корням коэффициенты l_1, l_2, l_3 . Для заданного значения $\lambda = -1,2$ находим $l_1 = 2,66; l_2 = 0,80; l_3 = 1,81$. С найденными коэффициентами l_1, l_2, l_3 наблюдателя приведено моделирование системы управления объектом второго порядка.

На рис. 1 представлена структурная схема моделирования САУ, в которой для компенсации возмущающего воздействия $F(t)$ подключено дополнительно к входному сумматору объекта интегрирующее звено, реализующее оценку восстановленного наблюдателем возмущения. На второй вход сумматора поступает управляющее воздействие $U(t)$.

При моделировании использован типовой ПИД-регулятор с параметрами настроек $K_P = 40, K_I = 0,5, K_D = 0,5$ и модель объекта в виде передаточной функции $W_o(p)$ с параметрами $k = 0,2, T_1 = 1$ мин, $T_2 = 1$ мин, $\tau = 1$ мин. Переходные процессы на выходе объекта и наблюдателя в системе с оценками регулируемой переменной $\hat{x}(t)$ и ее производной $\dot{\hat{x}}(t)$ в законе регулирования представлены на рис. 2, 3, 4.

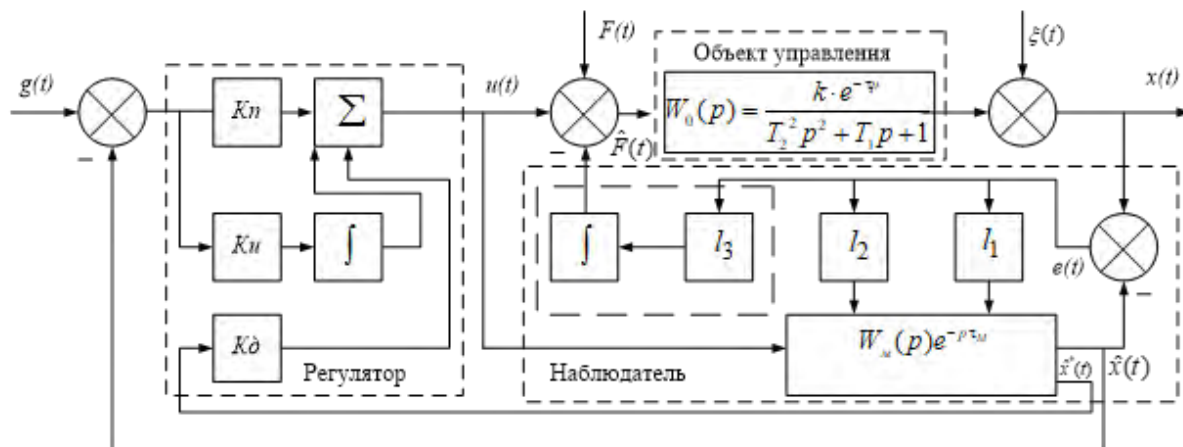


Рис. 1. Схема моделирования САУ с наблюдателем

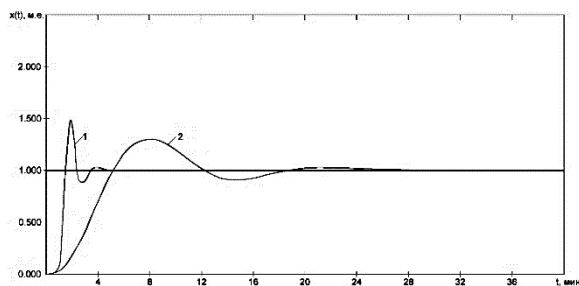


Рис. 2. Переходные процессы на выходе объекта при $K_P = 40$, $K_I = 0,5$, $K_D = 0,5$ (кривая 1) и $K_P = 1$, $K_I = 0,5$, $K_D = 0,5$ (кривая 2)

Из рис. 2 следует, что, несмотря на полную адекватность моделей объекта и наблюдателя, качество переходных процессов существенно зависит от параметров регулятора. Следовательно, настройку системы с наблюдателем необходимо рассматривать в совокупности с моделью и регулятором, как в основном контуре, так и в контуре с наблюдателем.

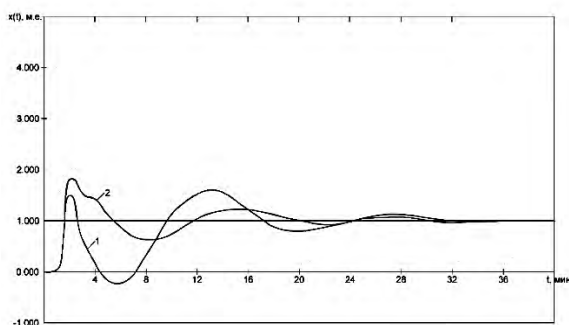


Рис. 3. Переходные процессы на выходе объекта (кривая 1) и наблюдателя (кривая 2) при $l_1 = l_2 = 0$; $K_P = 40$, $K_I = 0,5$, $K_D = 0,5$

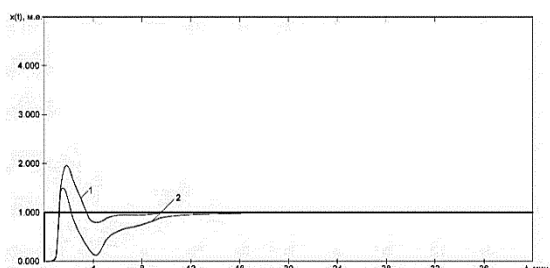


Рис. 4. Переходные процессы на выходе объекта (кривая 1) и наблюдателя (кривая 2) при $l_1 = 1$; $l_2 = 1$; $K_P = 40$, $K_I = 0,5$, $K_D = 0,5$

Несмотря на улучшение качества переходных процессов при значениях коэффициентов l_1 , l_2 , отличных от нуля, основным требованием к наблюдателю является асимптотическое стремление ошибки наблюдения $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$ к нулю при увеличении времени t до бесконечности. Это требование может быть выполнено только при компенсации внешнего неизмеряемого возмущения $F(t)$.

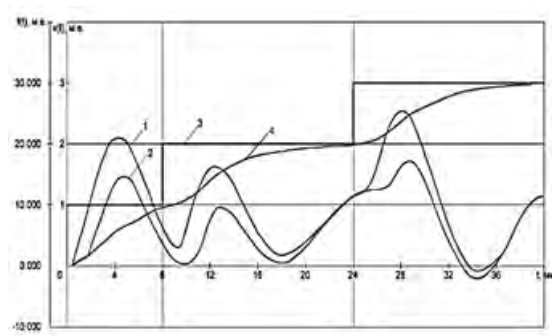


Рис. 5. Переходные процессы в системе с ПИД-регулятором при отсутствии компенсации $F(t)$: 1 – регулируемая переменная $x(t)$; 2 – оценка $\hat{x}(t)$; 3 – возмущение $F(t)$; 4 – оценка $\hat{F}(t)$

Для этого рассмотрим алгоритм компенсации влияния внешнего возмущения на объект, приняв, что величина $F(t)$ в заданном временном интервале является постоянной, но неизвестной величиной, а скорость ее на интервале ожидаемого переходного процесса равна нулю, т.е. $F(t) = \text{const}$, $dF(t)/dt = 0$. Возмущение является скачкообразным, изменяющимся по закону:

$$F(t) = \begin{cases} 10 \text{ м.е.} & \text{при } 0 \leq t \leq 8 \text{ мин;} \\ 20 \text{ м.е.} & \text{при } 8 \leq t \leq 24 \text{ мин;} \\ 30 \text{ м.е.} & \text{при } 24 \leq t \leq 40 \text{ мин;} \end{cases}$$

где t – время, мин; м.е. – машинные единицы.

Результаты оценок переменных x_1 , x_2 , возмущения $F(t)$ и переходных процессов в системе представлены на рис. 5 и 6. Из рис. 5 видно, что отсутствие компенсации возмущения на входе объекта приводит к неудовлетворительным переходным процессам, несмотря на то, что на втором и третьем интервалах ошибка оценивания стремится к нулю.

Переходные процессы в системе с наблюдателем и компенсацией возмущения с использованием оцениваемого $F(t)$ представлены на рис. 6. Обозначения кривых на рис. 6 аналогичны рис. 5.

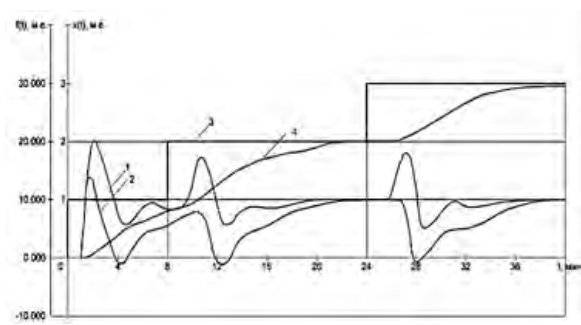


Рис. 6. Переходные процессы в системе с наблюдателем и компенсацией возмущения с использованием оцениваемого $F(t)$ при $l_1 = 2,66$; $l_2 = 0,80$; $l_3 = 1,81$

Результаты

Как видно из рис. 6, восстановление возмущения зависит от ошибки оценивания, которая при незначительном увеличении интервала оценивания стремится к нулю, а качество компенсации возмущения становится приемлемым. Это

подтверждается результатами моделирования системы компенсации вертикальной качки для морского судна, содержащей гидравлический привод для обеспечения соединения между судном и грузом, свешиваемым с судна. Привод реализует воздействие на изменение расстояния между грузом и судном для компенсации возмущений – вертикальной качки судна. Результаты компенсации ускорений гидравлического привода лебёдки судна на развитом волнении, по осям x , y , z , показаны на рис. 7, 8 и 9. Измерения выполнены акселерометром. Скомпенсированное ускорение стрелы по абсолютному значению приведено на рис. 10.

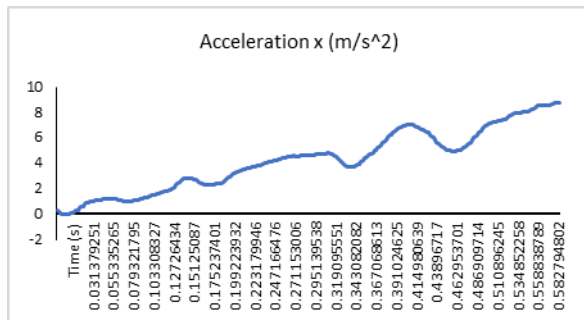


Рис. 7. Ускорения стрелы по оси x

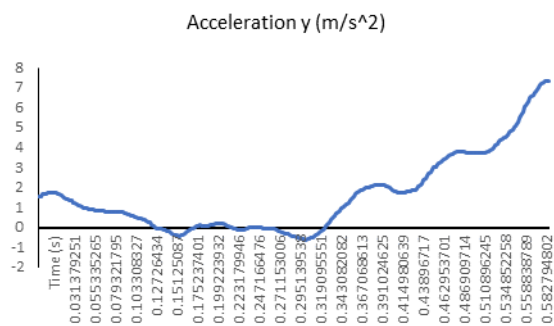


Рис. 8. Ускорения стрелы по оси y (положительное направление вниз)

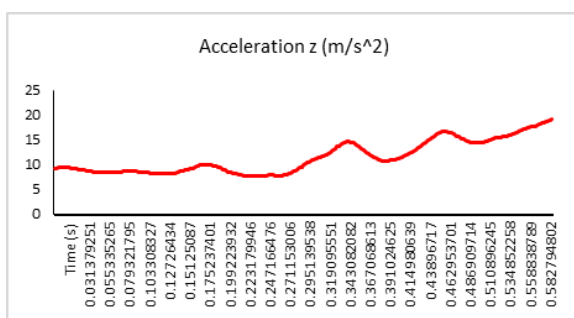


Рис. 9. Ускорения стрелы по оси z

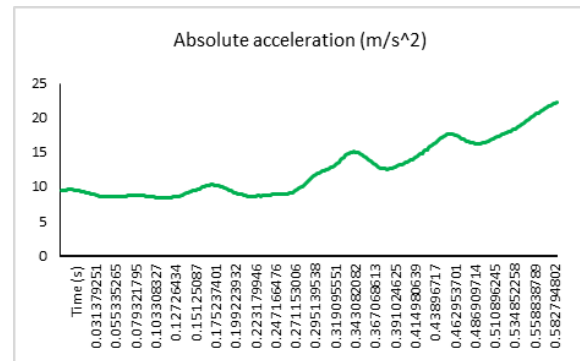


Рис. 10. Скомпенсированное ускорение стрелы по абсолютному значению

Ранее рассмотренные системы управления [13-15] не содержали канал компенсации неизмеряемого возмущения на основе восстановленного возмущения. В данной работе его компенсировали с помощью дополнительного интегрирующего звена, реализующего оценку восстановленного наблюдателем возмущения. Использование наблюдателей переменных состояний объекта и возмущения позволяет получить переходные процессы, протекающие при смене режимов функционирования системы в результате ступенчатого изменения внешнего воздействия на систему в области (на временном интервале), ограниченной допустимым временем реального протекания процессов в рассматриваемой динамической системе, а также в других сложных системах управления [16, 17].

Новизна поставленной и решенной задачи обоснована получением следующих результатов:

- предложен и реализован принцип синтеза управляющего воздействия с компенсацией неизмеряемого возмущения на основе информации об этом возмущении с использованием переменных состояний объекта, позволяющих восстановить возмущение и сформировать дополнительно к основному управлению на входе объекта составляющую, компенсирующую возмущение;
- реализована дифференциальная составляющая ПИД-регулятора с использованием оценки производной переменной объекта, что, в отличие традиционного метода реализации производной с помощью дифференцирования выходной переменной, улучшает качество управления, поскольку реализация производной на практике была возможна только с помощью реального дифференциатора первого порядка, чувствительного к помехам в измеряемом сигнале и вносимого дополнительную инерционность.

Выводы

Из полученных результатов следует, что предлагаемая методика может использоваться при синтезе систем управления, для которых нет возможности точно измерять возмущения, а достаточно асимптотической сходимости ошибок оценивания к нулю, при которых получаемые оценки возмущений сходятся к истинным постоянным значениям.

Заключение

В данной статье представлен принцип синтеза компенсирующего воздействия при неизмеряемом внешнем возмущении на основе его оценки, восстановленной с использованием наблюдателя переменных состояний и метода сигнальной коррекции основного управляющего воздействия регулятора. Реализуемый подход обеспечивает полную или частичную компенсацию возмущений при неизменной структуре системы управления и не требует усложнения структуры системы, в частности построения комбинированных систем для компенсации внешних возмущений.

В результате исследований наблюдателя для объекта с запаздыванием был разработан наблюдатель оценивания вектора состояния

динамического объекта в условиях действия внешних неизмеряемых возмущений, когда классические алгоритмы оценивания не адаптированы к этим условиям. Синтезированный наблюдатель позволяет дополнительно улучшить динамику системы управления по отношению к внешнему возмущающему воздействию, так как это воздействие идентифицируется. Применимость реализованного принципа идентификации подтверждается нахождением истинных значений и переменных состояний возмущений внутри заданных интервалов оценок и полученными переходными процессами. Результаты исследования получены для наиболее тяжёлого вида возмущения – ступенчатого. Однако предложенный принцип приемлем и для других видов возмущений.

Литература

1. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Перевощиков Ф. В. Анализ точности оценивания состояний асинхронного электропривода алгоритмами Льюенбергера и Калмана. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023 Т. 23, № 1 С. 35–43.
2. Mouna B.H., Lassaad S. Speed sensorless indirect stator field oriented control of induction motor based on Luenberger observer. Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. V. 3. 2006 P. 2473–2478.
3. Khadar S., Kouzou A., Hafaifa A. Sensorless direct torque control of induction motor with an open-end stator winding using an adaptive Luenberger observer. Proc. of the 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). 2018 P. 1355-1362
4. Низовцев, С.И. Адаптивные наблюдатели линейных нестационарных систем в условиях неизмеряемых возмущений: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Низовцев Сергей Игоревич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»]. Санкт-Петербург, 2021. 190 с.
5. Пшихопов В. X., Медведев М. Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных. Инженерный вестник Дона. 2011. Т. 16. №. 6. С. 169-175.
6. Красовский А. А. Циклическое оценивание при первичной обработке сигналов датчиков. Автоматика и телемеханика. 1988. №. 6. С. 52-60.
7. Медведев М. Ю. Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. Т. 89. №. 12. С. 2025.
8. Петров П.В. Наблюдатель полного и пониженного порядка [Электронный ресурс]. П. В. Петров, А. А. Сидорова; науч. рук. А. А. Сидорова. Молодежь и современные информационные технологии сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 04-07 декабря 2017 г., г. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники; под ред. С.С. Михалевич [и др.] Томск: Изд-во ТПУ, 2017 . С. 94-95 . Заглавие с титульного экрана. [Библиогр.: с. 95 (3 назв.)]. Свободный доступ из сети Интернет.
9. Лубенцова Е.В. Синтез наблюдателя состояния динамической системы при неизмеряемом возмущении. Математическое моделирование, компьютерные и информационные технологии в технике, экономике и образовании. Научно-практическая конференция. 2009. С. 89-93.
10. Лубенцова Е. В., Дракунов С. В. Разрывное управление нестационарными объектами с запаздыванием на основе адаптивного идентификатора. Математические методы в технике и технологиях. 2003. С. 83-85.
11. Лубенцова Е.В. Синтез адаптивной системы управления технологическим объектом с запаздыванием при неконтролируемых внешних возмущениях. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 9. С. 13-15.
12. Дракунов С.В. Адаптивный наблюдатель состояния. Методы синтеза систем с разрывными управлениями на скользящих режимах: сб. науч. тр. М.: Институт проблем управления, 1983. С. 11-24.
13. Данцевич И.М., Лубенцов В.Ф. Определение параметров гидродинамических коэффициентов в рабочих функциях управления телеуправляемых необитаемых аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 242—250.
14. Епихин А. И., Хекерт Е. В., Модина М. А. Принципы нейроуправления и варианты архитектуры нейронных сетей, применительно к сложной динамической системе СЭУ-СУДНО. Морские интеллектуальные технологии, 4(4), 2020, С. 18-22.
15. Дергилев В. А., Жук С. С., Аванесова Т. П. Анализ экономической целесообразности использования концепции системы автономного судовождения в порту, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 11—16.

16. Данцевич И. М. Морские интеллектуальные технологии. Адаптивное многослойное управление телеуправляемыми необитаемыми аппаратами. 2021. № 4-1 (54) С. 147-152.
17. Лубенцова Е.В., Масютина Г.В., Рудакова Т.А., Лубенцов В.Ф. Синтез интервальной системы управления с адаптивным ПИД-регулятором. Автоматизация в промышленности. 2013. № 9. С. 62-64.

References

1. Bukreev V. G., Shandarova E. B., Perevoshchikov F. V. Analysis of the accuracy of estimating the states of an asynchronous electric drive using the Luenberger and Kalman algorithms. Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics. 2023 T. 23, No. 1 P. 35–43.
2. Mouna B.H., Lassaad S. Speed sensorless indirect stator field oriented control of induction motor based on Luenberger observer. Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. V. 3. 2006 P. 2473–2478.
3. Khadar S., Kouzou A., Hafaifa A. Sensorless direct torque control of induction motor with an open-end stator winding using an adaptive Luenberger observer. Proc. of the 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). 2018 P. 1355-1362
4. Nizovtsev S.I. Adaptive observers of linear non-stationary systems under conditions of unmeasurable disturbances: specialty 05.13.01 "System analysis, control and information processing (by industry)": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Nizovtsev Sergey Igorevich; [Place of defense: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University ITMO"]. St. Petersburg, 2021. 190 p.
5. Pshikhov V. Kh., Medvedev M. Yu. Algorithmic support of robust asymptotic observers of derivatives. Engineering Bulletin of the Don. 2011. T. 16. No. 6. pp. 169-175.
6. Krasovsky A. A. Cyclic estimation during primary processing of sensor signals. Automation and telemechanics. 1988. No. 6. pp. 52-60.
7. Medvedev M. Yu. Structure and algorithmic support of a nonlinear observer of derivatives under conditions of random noise. News of the Southern Federal University. Technical science. 2008. T. 89. No. 12. S. 2025.
8. Petrov P.V. Observer of full and reduced order [Electronic resource]. P. V. Petrov, A. A. Sidorova; scientific hands A. A. Sidorova. Youth and modern information technologies, collection of proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists, December 04-07, 2017, Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Information Technologies and Robotics; edited by S.S. Mikhalevich [et al.] Tomsk: TPU Publishing House, 2017. pp. 94-95. Title from title screen. [Bibliography: p. 95 (3 titles)]. Free access from the Internet.
9. Lubentsova E.V. Synthesis of an observer of the state of a dynamical system under unmeasurable disturbance. Mathematical modeling, computer and information technologies in engineering, economics and education. Scientific and practical conference. 2009. pp. 89-93.
10. Lubentsova E. V., Drakunov S. V. Discontinuous control of non-stationary objects with delay based on an adaptive identifier. Mathematical methods in engineering and technology. 2003. pp. 83-85.
11. Lubentsova E.V. Synthesis of an adaptive control system for a technological object with a delay under uncontrolled external disturbances. Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2003. No. 9. pp. 13-15.
12. Drakunov S.V. Adaptive state observer. Methods for the synthesis of systems with discontinuous controls on sliding modes: collection of articles. scientific tr. M.: Institute of Management Problems, 1983. pp. 11-24.
13. Dantsevich I.M., Lubentsov V.F. Determination of parameters of hydrodynamic coefficients in the operating functions of control of remotely controlled uninhabited vehicles, Marine intelligent technologies. 2022. No. 4 part 1, pp. 242-250.
14. Epikhin A. I., Khekert E. V., Modina M. A. Principles of neurocontrol and options for the architecture of neural networks, in relation to the complex dynamic system SEU-SHIP. Marine intelligent technologies, 4(4), 2020, 18-22.
15. Dergilev V. A., Zhuk S. S., Avanesova T. P. Analysis of the economic feasibility of using the concept of an autonomous navigation system in a port, Marine Intelligent Technologies. 2023. No. 3 part 1, pp. 11-16.
16. Dantsevich I. M. Marine intelligent technologies. Adaptive multi-layer control of tele-controlled uninhabited vehicles. 2021. No. 4-1 (54) pp. 147-152.
17. Lubentsova E.V., Masyutina G.V., Rudakova T.A., Lubentsov V.F. Synthesis of interval control system with adaptive PID controller. Automation in industry. 2013. No. 9. pp. 62-64.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лубенцов Валерий Федорович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Valery F. Lubentsov, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Kuban State Technological University, 350072, Russia, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Лужевский Никита Олегович, аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Nikita O. Luzhevsky, graduate student of the Department of Automation of Production Processes, Kuban State Technological University, 350072, Russia, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Лубенцова Елена Валерьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; e-mail: elena-v-l@mail.ru

Elena V. Lubentsova, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Kuban State Technological University, 350072, Russia, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2; e-mail: elena-v-l@mail.ru

Лютикова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Lyutikova Marina N., Ph.D. (Eng.), Candidate of Technical Science, Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 06.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 21.11.2023.

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.028>

Оценка показателей надежности однотипных портовых перегрузочных машин с учетом ординарности и однородности потока отказов в эксплуатационных условиях

Аблязов Э.К.¹ amigab@mail.ru, Аблязов К.А.¹ kiril123@bk.ru¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова

Аннотация. В статье предлагается методика оценивания показателей надежности портовых перегрузочных машин (ППМ) с учетом ординарности и однородности потока отказов. В исследовании рассматривались отказы однотипных портовых перегрузочных машин в течение одного года эксплуатации. В основе оценивания показателей надежности ППМ используется статистическая информация об отказах автопогрузчиков "HYUNDAI 130D-7E" за календарный год. Под ординарностью потока отказов в данном исследовании предполагается, что одновременно возникает не более одного отказа, и без последствия. Оценка однородности потока отказов производится с использованием коэффициента вариации. Для определения числовых характеристик случайных величин и расчетных значений частот и эмпирической плотности вероятности, полученного статистического материала об отказах, используется усеченное нормальное распределение. Предложен критерий проверки гипотезы о выборе закона распределения, поступающего потока отказов, группы автопогрузчиков ППМ ПАО «Новороссийский морской торговый порт». В исследовании рассматривается практический пример анализа статистической информации об отказах. Предполагается использования предложенного метода для оценивания показателей надежности однотипных портовых перегрузочных машин в практических целях.

Ключевые слова: поток отказов, однородный во времени процесс, проверка гипотезы, усеченное нормальное распределение, показатели надежности.

Для цитирования: Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Оценка показателей надежности однотипных портовых перегрузочных машин с учетом ординарности и однородности потока отказов в эксплуатационных условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 232—241. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.028

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.028>

Evaluation of the reliability indicators of the same type of port handling machines, taking into account the ordinary and uniformity of the flow of failures in operational conditions

Emil K. Ablyazov¹ amigab@mail.ru, Kemal A. Ablyazov¹ kiril123@bk.ru¹Admiral Ushakov Maritime State University, Russian Federation

Abstract. The article proposes a methodology for estimating the reliability indicators of port transshipment machines (PPM), taking into account the ordinarieness and uniformity of the flow of failures. The study considered failures of the same type of port handling machines during one year of operation. Statistical information about failures of HYUNDAI 130D-7E forklift trucks for a calendar year is used as the basis for evaluating the reliability indicators of the PPM. Under the ordinary nature of the failure flow in this study, it is assumed that no more than one failure occurs at a time, and without aftereffect. The assessment of the homogeneity of the failure flow is made using the coefficient of variation. Truncated normal distribution is used to determine the numerical characteristics of random variables and the calculated values of the frequencies and empirical probability density of the obtained static material on failures. A criterion for testing the hypothesis on the choice of the distribution law, the incoming failure flow, a group of PPM forklifts of PJSC "Novorossiysk Commercial Sea Port" is proposed. The study considers a practical example of the analysis of statistical information about failures. It is supposed to use the proposed method for evaluating the reliability indicators of the same type of port handling machines for practical purposes.

Keywords: failure flow, time-homogeneous process, hypothesis testing, truncated normal distribution, reliability indicators.

For citation: Emil K. Ablyazov, Kemal A. Ablyazov, Evaluation of the reliability indicators of the same type of port handling machines, taking into account the ordinarieness and uniformity of the flow of failures in operational conditions, Marine intelligent technologies. 2023. № 4 part 1, P. 232—241. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.028

Введение

Основные параметры надежности изделия имеют существенное рассеяние, поэтому их необходимо рассматривать в вероятностном аспекте. Под изделием будем понимать портовую перегрузочную

машину (ППМ). Параметры надежности используются в статистической трактовке для оценки состояния и в вероятностной трактовке - для прогнозирования. Статистическая трактовка параметров надежности выражает их в дискретных числах, которые называют оценками. При достаточно

большом объеме выборки статистические трактовки можно принять за истинные характеристики надежности. В дальнейшем при рассмотрении параметров надежности будем трактовать их как статистические.

Анализ зарубежных и отечественных литературных источников показывает, что для обработки статистических данных отказов изделий используются такие законы распределения как: экспоненциальный, Вейбулла, Гаусса, логарифмическо-нормальный, Вейбулла-Гнеденко и др. Выбор корректного способа оценивания показателей надежности зависит от технического состояния изделия [1-7, 8, 10, 11, 12, 13, 14]. Оценивание характеристик надежности ППМ в условиях эксплуатации возможно производить на основе выборок генеральной совокупности (генеральной совокупностью будем называть все множество возможных значений отказов однотипных машин).

В процессе функционирования техническое изделие проходит три периода, а именно: приработка, то есть при работе изделия в начальный период происходит отбраковка конструктивных, технологических и производственных дефектов; нормальная эксплуатация, характеризующаяся внезапными отказами приблизительно постоянной интенсивности; старения, когда появляются отказы возрастающей интенсивности, вызываемые старением и износом изделия. Для каждого периода характерна определенная тенденция поведения интенсивности отказов. Например, в период приработки значение интенсивности отказов повышено, а в периоде нормальной эксплуатации имеет минимальное значение и является приблизительно постоянной величиной. Период нормальной эксплуатации характеризуется длительной работой изделия и в этот период обычно происходят внезапные отказы, которые носят случайный характер. Наконец, третий период старения и износа изделия характеризуется появлением отказов возрастающей интенсивности. Для отказов, возникающих из-за износа и старения, наиболее универсальным, удобным и широко применяемым для практических расчетов является нормальное распределение. Нормальному распределению подчиняется наработка до отказа многих восстанавливаемых и не восстанавливаемых изделий, размеры и ошибки измерений деталей и т.д. [8, 9, 13, 14]. При использовании нормального закона распределения решаются такие задачи как: оценка вероятности безотказной работы за данное время или за данную наработку; определение времени или наработки, соответствующих заданной вероятности безотказной работы; параметр потока отказов; интенсивность отказов, средним числом отказов за время t и др. Определение параметров надежности при использовании нормального закона распределения осуществляется по простым формулам и имеющимся таблицам, к тому же он обладает свойством композиции распределений, то есть, если каждая случайная величина подчинена нормальному закону распределения, то их сумма также будет являться нормальным распределением, математическое ожидание и дисперсия композиции суммируются. Благодаря вышесказанному это распределение часто используется. При малых

коэффициентах вариации, нормальное распределение хорошо заменяет биномиальное, пуассоновское и логарифмическое нормальное распределения [10].

При больших значениях коэффициента вариации $v > 0,4$, можно применять усеченное нормальное распределение, которое получается из нормального при ограничении интервала изменения случайной величины. При нормальном (гауссовом) распределении случайной величины она может принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$. Поскольку возможные значения случайной наработки до отказа

$\tilde{t}_{cp}$ могут быть только положительными, то возможно применять усеченное нормальное распределение. Поток отказов предполагают ординарным, при котором одновременно возникает не более одного отказа, и без последования, что означает взаимную независимость появления отказов в разные (непересекающиеся) промежутки времени.

Сбор и обработка информации о надежности позволяет производить:

- накопление материалов, необходимых для оценивания количественных значений показателей надежности;
- изучение влияния условий и особенностей эксплуатации на надежность;
- разработка мероприятий, позволяющих устранять конструктивные, технологические и другие недостатки машин, разработка и совершенствование при их эксплуатации;
- разработка и совершенствование методов технической эксплуатации машин и организации работ обслуживающего персонала;
- накопление сведений, необходимых для установления норм запасных частей, ремонтных нормативов и совершенствования системы ремонтов.

Актуальность настоящей работы состоит в описании и исследовании методики оценивания показателей надежности оборудования ППМ с учетом ординарности и однородности потока отказов с применением усеченного нормального распределения. Оценка однородности производится с использованием коэффициента вариации (v), который определяется как отношение среднего квадратического отклонения к средней величине признака. Это относительный показатель вариации, часто измеряется в процентах и рассчитывается по формуле: $v = \sigma / \tilde{t}_{cp}$. По величине коэффициента вариации можно судить об интенсивности вариации признака, и, следовательно, об однородности состава совокупности. Чем больше величина коэффициента вариации, тем больше неоднородность совокупности. Совокупность считается однородной, если коэффициент вариации признака не превышает 33% [9].

В работе дана оценка показателей надежности однотипных портовых перегрузочных машин с учетом ординарности и однородности потока отказов в эксплуатационных условиях.

Вначале рассматриваются вопросы, связанные с исходными данными об отказах. Затем, описывается методика оценки показателей надежности оборудования ППМ (этапы исследования). Далее раскрывается содержание каждого этапа и

приводится пример анализа данных об отказах группы оборудования ППМ ПАО «НМТП». По результатам работы приводятся выводы и намечаются дальнейшие направления исследований.

Постановка проблемы

Информация об отказах оборудования ППМ фиксируется в специальном журнале ремонтов. Отмечается время обнаружения отказа и причина, по которой он произошел. При этом выяснить, какой именно элемент из совокупности однотипного оборудования отказал, когда тот или иной элемент установлен в систему, сколько времени он находился на хранении, каков характер и длительность ремонта, не всегда представляется возможным. Статистическая информация, поступающая для анализа, представлена следующим образом: известно количество отказов элементов n_i из совокупности однотипных объектов заданного

объема m , реализовавшихся на i -м интервале наблюдения. Информация об отказах распределена по месяцам эксплуатации ППМ за 2021 г. (таблица 1), т.е. является группированной. После очередного отказа (по той или иной причине) производится ремонт данной единицы оборудования. Время восстановления объекта предполагается пренебрежимо малым по сравнению с наработками до отказа и восстановление является полным.

На основании таблицы 1 определяется представительность статистики данных об отказах. Рассмотрим ситуации, касающиеся возможного объема данных об отказах. Возможны 3 случая:

1) $m \gg n$ – число объектов находящихся под наблюдением много больше зафиксированного количества отказов (этот случай соответствует ситуации, когда большинство объектов еще ни разу не отказало);

Таблица 1

Представления статистической информации об отказах автопогрузчиков "HYUNDAI 130D-7E" за 2021 год

Месяцы эксплуатации	Янв	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Число отказов, n_i	9	16	20	21	21	24	31	38	30	11	8	7
Общее количество отказов $n = \sum n_i$	236											
Количество однотипных автопогрузчиков "HYUNDAI 130D-7E", m единиц	14											

2) m близко к n , $m \approx n$ – ситуация, согласно которой каждый из m объектов в среднем отказал по одному разу;

3) $m \ll n$ – соответствует случаю, когда каждый из m объектов в среднем отказал более одного раза.

В случаях 1 и 2 статистику данных об отказах нельзя считать представительной, т.е. делать выводы на основании анализа данных такого объема некорректно [11]. В дальнейшем, среднее число отказов n будем считать значимым, если $n \geq 10$.

Обработка эксплуатационных данных за один год эксплуатации автопогрузчика "HYUNDAI 130D-7E" за 2021 год для оценивания числовых характеристик и вида закона распределения случайных величин показана на примере определении величины наработки на отказ и закона распределения случайных значений времени безотказной работы в таблице 2. Для удобства расчетов интервалы примем равными 30 суткам.

Количество интервалов в нашем случае равно двенадцати. Большее число интервалов принимается для обширного однородного статистического материала [9].

Расчет ведется в допущении, что ППМ одного типа независимо от их количества рассматриваются как одно изделие.

С увеличением объема выборки функция распределения исследуемого параметра приближается к функции распределения этого параметра для генеральной совокупности. Однако статистические функции распределения и ее любые параметры, а также как и величины показателей надежности, определяемые на основании ограниченного объема данных, всегда содержат элементы случайности. Поэтому при исследовании надежности значения параметров для генеральной совокупности можно получить лишь с некоторой вероятностью. Такие параметры называются оценками.

Таблица 2

Сводная таблица для определения числовых характеристик случайных величин и расчетных значений частот и эмпирической плотности вероятности

Месяцы и интервалы в сутках (Δt)	Середина интервала, $\bar{t}_i$	Кол-во отказов элементов, n_i	Частота, n/n	$\bar{t}_i (n/n)$	$(\bar{t}_i - \bar{t}_{cp})^2$	$(\bar{t}_i - \bar{t}_{cp})^2 \cdot n_i / n$	Эмпир. плотн. вероятн., $n_i / (n \cdot \Delta t)$
Январь 0-30	15	9	0,0381	0,5720	26104,1540	995,4974	0,0013
Февраль 30-60	45	16	0,0678	3,0508	17310,0860	1173,5652	0,0023
Март - 60-90	75	20	0,0847	6,3559	10316,0180	874,2388	0,0028
Апрель 90-120	105	21	0,0890	9,3432	5121,9500	455,7667	0,0030
Май 120-150	135	21	0,0890	12,0127	1727,8820	153,7522	0,0030
Июнь 150-180	165	24	0,1017	16,7797	133,8140	13,6082	0,0034
Июль 180-210	195	31	0,1314	25,6144	339,7460	44,6277	0,0044
Август 210-240	225	38	0,1610	36,2288	2345,6780	377,6939	0,0054
Сентябрь 240-270	255	30	0,1271	32,4153	6151,6100	781,9843	0,0042
Октябрь 270-300	285	11	0,0466	13,2839	11757,5420	548,0210	0,0016
Ноябрь 300-330	315	8	0,0339	10,6780	19163,4740	649,6093	0,0011
Декабрь 330-360	345	7	0,0297	10,2331	28369,4060	841,4654	0,0010
		$\sum n_i = 236$	$\sum = 1,0$	$\sum = 176,5678$		$\sum = 6909,8301$	

На основании данных таблицы 2 могут быть найдены основные числовые характеристики случайной величины: статистическое среднее $\bar{t}_{cp}$:

$$\bar{t}_{cp} = \sum_{i=1}^k \bar{t}_i \cdot n_i / n \quad (1)$$

где $\bar{t}_i$ – середина i -го интервала; k – число интервалов ($k=12$); n – количество отказов элементов в течение года.

Вычисления дают следующее значение $\bar{t}_{cp} = 176,57 \text{ сут}$, которое является оценкой наработки на отказ автопогрузчика.

Вычисляется статистическая дисперсия:

$$\bar{D}_{cp} = \sum_{i=1}^k (\bar{t}_i - \bar{t}_{cp})^2 \cdot n_i / n = 6909,8301 \text{ сут}^2 \quad (2)$$

Соответственно, среднее квадратическое отклонение будет равно:

$$\bar{\sigma}_t = \sqrt{\bar{D}_{cp}} = 82,13 \text{ сут} \quad (3)$$

Вычисляем оценку коэффициента вариации:

$$v = \bar{\sigma}_t / \bar{t}_{cp} = 0,47.$$

Существенное расхождение по величине оценок математического ожидания и среднего квадратического отклонения не позволяет принять гипотезу об экспоненциальном законе распределения случайных значений времени отказов [9].

По величине коэффициента вариации можно судить об интенсивности вариации признака, и,

следовательно, об однородности состава совокупности. Чем больше величина коэффициента вариации, тем больше неоднородность совокупности. Совокупность считается однородной, если коэффициент вариации признака не превышает 33%; если от 33 до 60, то степень однородности средняя; 60 и более – неоднородная [9]. Оценивая значение коэффициента вариации $v = 0,47$, можно сделать предварительное заключение о выборе усеченного нормального закона распределения, так как при нормальном законе область допустимых значений коэффициента вариации ограничена: $0 < v < 0,33$. Если $v > 0,33$, то формально необходимо воспользоваться усеченным нормальным законом [10, 11].

Проверка согласия между эмпирическим и теоретическим распределениями по критерию согласия χ^2 Пирсона

Эмпирическая плотность распределения рассматривается как некоторое приближение к соответствующей теоретической плотности распределения. Степень приближения между этими плотностями возрастает по мере увеличения числа наблюдений. Таким образом, имея некоторый эмпирический ряд распределения случайной величины, его можно описать математической моделью-законом распределения.

Проверка согласия между эмпирическим и теоретическим распределениями можно осуществить по критерию Пирсона. Широкое применение критерия χ^2 обосновывается легкостью его

использования для проверки согласия любого распределения.

Проверка согласия между эмпирическим и теоретическим распределением производится в следующей последовательности:

- определяется число интервалов k , на которые разбиваются полученные эмпирические данные. Все интервалы рекомендуется брать одинаковой длины;
- определяются оценки проверяемого теоретического распределения по группированным значениям t_i , считая их сконцентрированными в средней точке каждого интервала;
- подсчитывается число наблюдений в каждом интервале. Интервалы, в которых встречаемость частот n_i (количество наблюдений) меньше 5, объединяются с соседними;
- определяется вероятность P_i попадания в каждый интервал случайной величины, имеющий принятый по гипотезе закон распределения;
- вероятность попадания наблюдений в интервал умножается на объем выборки n , то есть определяется математическое ожидание P_i числа наблюдений в каждом интервале для принятой теоретической модели;
- вычисляется критерий согласия χ^2 Пирсона [9]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i} \quad (4)$$

Величина χ^2 асимптотически подчиняется распределению χ^2 с числом степеней свободы:

$$r = k - l - 1, \quad (5)$$

где l - число параметров теоретического распределения ($l = 2$); k - число интервалов ($k=12$). Тогда с учетом выше представленных значений $r = 9$.

Чем меньше полученное значение χ^2 , тем лучше согласие между эмпирическим и теоретическим распределением.

В графу 4 записываются квантили $y_i = (\tilde{t}_i - \tilde{t}_{cp}) / \tilde{\sigma}_i$ нормального распределения.

Значения табулированной функции $f_0(y_i)$, формулы бсведены в графу 5 таблицы 3:

$$f_0\left(\frac{\tilde{t}_i - \tilde{t}_{cp}}{\tilde{\sigma}_i}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \quad (6)$$

Вычисляется по формуле (7) вероятность попадания эмпирических данных в каждый интервал:

$$P_i = f(t_i) \Delta t = f_0(y_i) \Delta t / \tilde{\sigma}_i \quad (7)$$

где $\Delta t = 30$ суткам. Полученные результаты записываются в графу 6 таблицы 3.

В графы 7, 8, 9 таблицы 3 вычисляются и записываются все значения показателей, необходимых для вычисления χ^2 . Сумма значений графы 9 дает значение согласия $\tilde{\chi}^2$ Пирсона. Чем меньше полученное значение $\tilde{\chi}^2$, тем лучше согласие между эмпирическим и теоретическим распределением. После вычисления

Таблица 3

Последовательность вычисления критерия согласия Пирсона

i	t_i	n_i	y_i	$f_0(y_i)$	P_i	nP_i	$n_i - nP_i$	χ^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	15	9	-1,9437	0,0608	0,0219	5,1782	3,8218	2,8207
2	45	16	-1,5828	0,1145	0,0413	9,7517	6,2483	4,0035
3	75	20	-1,2219	0,1895	0,0684	16,1393	3,8607	0,9235
4	105	21	-0,8610	0,2756	0,0995	23,4722	-2,4722	0,2604
5	135	21	-0,5001	0,3251	0,1173	27,6881	-6,6881	1,6155
6	165	24	-0,1392	0,3951	0,1426	33,6498	-9,6498	2,7673
7	195	31	0,2217	0,3894	0,1405	33,1643	-2,1643	0,1412
8	225	38	0,5826	0,3372	0,1217	28,7186	9,2814	2,9996
9	255	30	0,9435	0,2565	0,0926	21,8455	8,1545	3,0439
10	285	11	1,3044	0,1714	0,0619	14,5978	-3,5978	0,8867
11	315	8	1,6653	0,0989	0,0357	8,4231	-0,4231	0,0213
12	345	7	2,0262	0,0508	0,0183	4,3265	2,6735	1,6520
		$\Sigma=236$			$\Sigma=1$			$\Sigma=21,1356$

$\tilde{\chi}^2$ можно задаться и уровнем значимости $\alpha = 1 - \gamma$, то есть вероятностью того, что вычисленное значение $\tilde{\chi}^2$ превысит табличную величину χ^2 :

$$\alpha = \text{Вер}\{\chi^2 > \tilde{\chi}^2\} \quad (8)$$

Критическую область образуют все значения $\chi^2 > \tilde{\chi}^2$. Заключение, что проверяемая гипотеза отвергается, то есть опытное распределение не

соответствует предполагаемому, делают, если вычисленное значение критерия согласия $\tilde{\chi}^2$ попадает в критическую область, то есть χ^2 будет больше вычисленного значения $\tilde{\chi}^2$, соответствующего выбранному уровню значимости $\alpha = 1 - \gamma$. При значении $\chi^2 \geq \tilde{\chi}^2$ гипотеза не отвергается. Уровень значимости $\alpha = 1 - \gamma$ может быть принят в пределах (0,01...0,3). Обычно доверительная вероятность задается, а доверительный интервал вычисляется [11].

Вывод о согласованности эмпирических данных с выбранной по гипотезе моделью теоретического распределения

По таблице определяется значение критерия согласия χ^2 Пирсона в зависимости от уровня значимости $\alpha = 0,01$ при степени свободы $k=9$ и получается табличное значение $\chi^2 = 21,666$, то есть вычисленное значение $\tilde{\chi}^2 = 21,1356 < \chi^2 = 21,666$, что

подтверждает правильность гипотезы о выбранном законе распределения.

Плотность вероятности отказов и интенсивность отказов в случае усеченного нормального распределения

Распределение Гаусса используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износных) отказов и при нормальном законе распределения коэффициент вариации обычно не превышает $v < 0,3$ [9]. В случае, когда коэффициент вариации $v > 0,4$, то возможно применять усеченный нормальный закон распределения [10].

При усеченном нормальном законе распределения используют плотность вероятности отказов, определяемой по формуле (9):

$$f(t) = \frac{c}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}, t \geq 0 \quad (9)$$

где T_1 - средняя наработка до отказа; σ - среднее квадратическое отклонение; c - нормирующий множитель, определяемый из выражения:

$$P(150) = \frac{\Phi\left(\frac{176,57 - 150}{82,13}\right)}{\Phi\left(\frac{176,57}{82,13}\right)} = \frac{\Phi(0,3235)}{\Phi(2,15)} = \frac{0,1255}{0,4842} = 0,26$$

Определяем нормирующий множитель:

$$c = \frac{1}{0,5 + \Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} = \frac{1}{0,5 + \Phi\left(\frac{176,57}{82,13}\right)} = \frac{1}{0,5 + 0,4842} = 1,02$$

Вычисленное значение нормирующего множителя только на 0,02 отличается от единицы. Это свидетельствует о том, что все вычисленные параметры надежности усеченного нормального распределения мало чем будут отличаться от

$$c \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (10)$$

Тогда из выражения (10):

$$c = \frac{1}{0,5 + \Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} \quad (11)$$

Формулы к усеченному нормальному распределению следующие:

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \frac{\Phi\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} \quad (12)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot \Phi\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)} \quad (13)$$

Используя выше приведенные формулы, решим репрезентативный пример №1.

Репрезентативный пример №1

Пусть время работы изделия до отказа подчинено усеченному нормальному закону с параметрами среднего значения времени работы до отказа $\tilde{t}_{cp} = 176,57 \text{ сут}$ и среднего квадратичного отклонения $\tilde{\sigma}_t = 82,13 \text{ сут}$. Вычислить вероятность безотказной работы изделия и плотность вероятности отказов для $t = 150$ суткам.

Решение. Так как средняя наработка до отказа $\tilde{t}_{cp} = 176,57 \text{ сут}$, то вероятность безотказной работы изделия за $t = 150$ суткам согласно формуле (12) будет равна:

значений, вычисленных с использованием формул для нормального распределения.

Зная нормирующий множитель, определяем плотность вероятности отказов:

$$f(t) = \frac{c}{\tilde{\sigma}_t \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tilde{t}_{cp})^2}{2\tilde{\sigma}_t^2}} = f(150) = \frac{1,02}{82,13 \cdot \sqrt{2 \cdot 3,14}} \cdot e^{-\frac{(150-176,57)^2}{2 \cdot 82,13^2}} = 0,0047 \frac{1}{сут}.$$

Вычисляем интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\tilde{t}_{cp})^2}{2\tilde{\sigma}_t^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \tilde{\sigma}_t \cdot \Phi\left(\frac{\tilde{t}_{cp}-t}{\tilde{\sigma}_t}\right)} = \lambda(150) = \frac{e^{-\frac{(150-176,57)^2}{2 \cdot 82,13^2}}}{\sqrt{2 \cdot 3,14} \cdot 82,13 \cdot \Phi\left(\frac{176,57-150}{82,13}\right)} = 0,0367 \frac{1}{сут}.$$

При тех же значениях данных репрезентативного примера 1 рассмотрим решение примера 2 с использованием распределения Рэлея, которое часто используется для описания поведения изнашивающихся или стареющих изделий.

Распределение Рэлея - непрерывное распределение вероятностей с плотностью распределения вероятности отказов:

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \quad (14)$$

при $t \geq 0$, зависящей от масштабного параметра $\sigma > 0$ (параметр распределения). Распределение имеет положительную асимметрию, его единственная мода находится в точке $t = \sigma$.

Вероятность безотказной работы вычисляется из выражения [11]:

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}. \quad (15)$$

Интенсивность отказов находится из выражения:

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma^2}. \quad (16)$$

Среднее время безотказной работы изделия определяется по формуле:

$$m_t = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (17)$$

Среднее квадратичное отклонение определяется из соотношения:

$$\sigma_t = \sigma \cdot \sqrt{\frac{4-\pi}{2}}. \quad (18)$$

Откуда находится значение моды распределения Рэлея [11]:

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{\sqrt{\frac{4-\pi}{2}}}. \quad (19)$$

Рассмотрим репрезентативный пример 2, если время работы изделия до отказа подчиняется закону распределения Рэлея.

Репрезентативный пример 2

Время работы изделия до отказа подчинено закону распределения Рэлея. Вычислить количественные характеристики надежности изделия: вероятность безотказной работы $P(t)$; плотность вероятности отказов $f(t)$; интенсивность отказов $\lambda(t)$, среднее время безотказной работы изделия t_{cp} для $t = 150$ суток, если среднее квадратичное отклонение $\tilde{\sigma}_t = 82,13$ сут

Решение:

$$1. \sigma = \frac{\sigma_t}{\sqrt{\frac{4-\pi}{2}}} = \frac{82,13}{\sqrt{\frac{4-3,14}{2}}} = 124,44 \text{ сут}$$

$$2. P(150) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{150^2}{2 \cdot 124,44^2}} = 0,4836$$

$$3. f(150) = \frac{t}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} = \frac{150}{124,44^2} \cdot e^{-\frac{150^2}{2 \cdot 124,44^2}} = 0,0047 \frac{1}{сут}$$

$$4. \lambda(150) = \frac{t}{\sigma^2} = \frac{150}{124,44^2} = 0,0097 \frac{1}{сут}$$

$$5. t_{cp} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 124,44 \cdot 1,253 = 155,92 \text{ сут}.$$

Результаты

Рассмотренные законы распределения времени возникновения отказов могут в большинстве случаев характеризовать надежность сложной системы, но на ограниченных участках времени ее работы. Так, например, на участке приработки время возникновения отказов может подчиняться гамма-распределению или Вейбулла, на участке нормальной работы - экспоненциальному, а на участке старения - нормальному [11, 12].

В связи с этим для оценки надежности сложной системы на длительном участке ее эксплуатации целесообразно использовать суперпозицию рассмотренных законов. Чтобы получить теоретическое распределение, близкое к экспериментальному, иногда применяют следующий прием. Плотность распределения наработки до отказа считается равной сумме: $f(t) = c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t)$, где c_1 и c_2 — коэффициенты веса, учитывающие влияние различных слагаемых, $c_1 + c_2 = 1$; $f_1(t)$ и $f_2(t)$ — теоретические распределения определенного вида [10].

Например, влияние постепенных отказов может быть учтено при суперпозиции экспоненциального и усеченного нормального законов распределения в следующем виде:

$$P(t) = c_1 P_1(t) + c_2 P_2(t) \quad (20)$$

где c_1 и c_2 - коэффициенты, учитывающие степень влияния внезапного и постепенных отказов, $c_1 + c_2 = 1$; $P_1(t)$ и $P_2(t)$ - вероятности безотказной работы для экспоненциального и нормального распределений [10].

Репрезентативный пример 3.

Допустим, что имеется суперпозиция двух экспоненциальных распределений:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}. \quad (21)$$

Используя формулу (21) можно определить функцию надежности формула (22), интенсивность отказов выражение (23), среднюю наработку на отказ выражение (24).

$$P(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (22)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}, \quad (23)$$

$$t_{cp} = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}. \quad (24)$$

Для обоснованного выбора типа практического распределения наработки до отказа необходимо большое количество отказов с объяснением физических процессов, происходящих в объектах перед отказом [11, 12].

Заключение

В работе рассмотрена методика анализа статистических данных об отказах для оценивания показателей надежности оборудования ППМ в случае однородности потока отказов. Получаемая информация о надежности должна позволять:

- оценивать различные типы ППМ, комплексов и агрегатов по их надежности;
- устанавливать статистические закономерности потоков отказов и восстановлений; изучать характер и причины отказов ППМ и их элементов;
- выявлять элементы, лимитирующие надежность ППМ;
- определять предельное состояние элементов;
- обосновывать и контролировать эффективность мероприятий по повышению надежности.

В высоконадежных элементах во время эксплуатации или испытаний на надежность, отказывает лишь незначительная часть первоначально имеющихся объектов. Поэтому значение числовых характеристик, найденное в результате обработки опытных данных, сильно зависит от типа предполагаемого распределения наработки до отказа. При различных законах наработки до отказа значения средней наработки до отказа, вычисленные по одним и тем же исходным данным, могут отличаться в сотни раз. Поэтому вопросу выбора теоретической модели распределения наработки до отказа необходимо уделять особое внимание с соответствующим доказательством приближения теоретического и экспериментального распределений.

В качестве направлений дальнейших исследований можно отметить следующее направление работы: оценивание показателей надежности оборудования ППМ в случае неоднородности потока отказов и точности получаемых оценок.

Литература

1. Razzaghi M. On the Estimation of Binomial Success Probability with Zero Occurrence in Sample. Journal of Modern Applied Statistical Methods. 2002. Т. 1. № 2. p. 8.
2. O'Conner, P.D.T., Practical Reliability Engineering, John Wiley&Sons, 1995
3. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology. Part 1. RAC Journal. 2001. N 1. pp. 1–4.
4. Jorge Luis Romeu, Statistical analysis of reliability data, part 1: Random Variables, Distributions, Parameters, and data IIT research Institute. The journal of the reliability analysis center (RAC), first quarter 2001, pp. 9-14
5. Bryc Włodzimierz, The Normal Distribution: Characterizations with Applications. Springer Verlag, 1995. ISBN 978-0-387-97990-8
6. Andrew Gelman, John B. Carlin, Hal S. Stern, David B. Dunson, Aki Vehtari, Donald B. Rubin, Bayesian Data Analysis. Third edition. (with errors fixed as of 15 February 2021)
7. David W. Duma, Kenneth J. Krieg, Systems Engineering for Mission Success, DoD guide for achieving reliability, availability, and maintainability. August 3, 2005
8. Кокушин Н.Н., Тихонов А.А., Петров С.Г., Головкин В.Е., Ключкин И.В. Надежность машин и оборудования. Учебное пособие. СПб., изд. СПбГТУРП, 2013, 67с.

9. Бережная Л.И., Колядов Л.В., Тарасенко П.Ф. Систематизация и анализ статистической информации с помощью аналитической группировки. Использование показателей вариации в анализе взаимосвязей признаков социально-экономических явлений. Учебное пособие. М., изд. «Нефть и газ», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014, 30 с.
10. Шишмарёв В. Ю. Надежность технических систем: учебник для вузов. 2-е изд., исправленное и дополненное. М., изд. Юрайт, 2023, 289 с.
11. Кравченко Е.Г. Надежность технических систем в машиностроении: учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014, 126 с.
12. Деружинский В. Е., Аблязов К.А., Аблязов Э. К. Критерии выбора закона распределения отказов при расчете эксплуатационной надежности элементов перегрузочных машин. Эксплуатация морского транспорта - №4 (93), 2019, 122-131 с.
13. Шеманин В.Г., Аблязов К.А., Аблязов Э.К. Оценка количественных значений показателей надежности портовых перегрузочных машин в эксплуатационных условиях. Эксплуатация морского транспорта №1 (102), 2022, 12-15 с.
14. Аблязов Э.К., Деружинский Г.В., Аблязов К.А. Оценка надежности быстровосстанавливаемых элементов перегрузочных машин и механизмов (2021), Journal of Physics: Conference Series, 2061 (1), статья № 012085

References

1. Razzaghi M. On the Estimation of Binomial Success Probability with Zero Occurrence in Sample. Journal of Modern Applied Statistical Methods. 2002. Т. 1. № 2. p. 8.
2. O'Conner, P.D.T., Practical Reliability Engineering, John Wiley&Sons, 1995
3. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology. Part 1. RAC Journal. 2001. N 1. pp. 1–4.
4. Jorge Luis Romeu, Statistical analysis of reliability data, part 1: Random Variables, Distributions, Parameters, and data IIT research Institute. The journal of the reliability analysis center (RAC), first quarter 2001, pp. 9-14
5. Bryc Wlodzimierz, The Normal Distribution: Characterizations with Applications. Springer Verlag, 1995. ISBN 978-0-387-97990-8
6. Andrew Gelman, John B. Carlin, Hal S. Stern, David B. Dunson, Aki Vehtari, Donald B. Rubin, Bayesian Data Analysis. Third edition. (with errors fixed as of 15 February 2021)
7. David W. Duma, Kenneth J. Krieg, Systems Engineering for Mission Success, DoD guide for achieving reliability, availability, and maintainability. August 3, 2005
8. Kokushin N.N., Tikhonov A.A., Petrov S.G., Golovko V.E., Klyushkin I.V. Nadezhnost' mashin i oborudovaniya [Reliability of machines and equipment]. Uchebnoeposobie.SPb., izd. SPbGTURP, 2013, 67s.
9. Berezhnaya L.I., Kolyadov L.V., Tarasenko P.F. Sistematzatsiya i analiz statisticheskoy informatsii s pomoshch'yu analiticheskoy gruppировки. Ispol'zovanie pokazateley variatsii v analize vzaimosvyazey priznakov sotsial'no-ekonomicheskikh yavleniy [Systematization and analysis of statistical information using analytical grouping. The use of variation indicators in the analysis of the relationship of signs of socio-economic phenomena]. Uchebnoe posobie. M., Izdatel'stvo Neft' i gaz.RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2014, 30 s.
10. Shishmarev V. Yu. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: uchebnik dlya vuzov [Reliability of technical systems: a textbook for universities]. 2-e izd., ispravlennoe i dopolnennoe. M., Izdatel'stvo Yurayt, 2023, 289 s.
11. Kravchenko E.G. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem v mashinostroenii [Reliability of technical systems in mechanical engineering]. Uchebnoe posobie. Komsomol'sk-na-Amure, izd. FGBOU VPO «KNAAGTU», 2014, 126 s.
12. Deruzhinskiy V. E., Ablyazov K.A., Ablyazov E. K. Kriterii vybora zakona raspredeleniya otkazov pri raschete ekspluatatsionnoy nadezhnosti elementov peregruzochnykh mashin [Criteria for choosing the law of failure distribution when calculating the operational reliability of elements of reloading machines]. Operation of marine transport. Ekspluatatsiya morskogo transporta №4 (93), 2019, 122-131 s.
13. Shemanin V. G., Ablyazov K. A., Ablyazov E. K. Otsenka kolichestvennykh znacheniy pokazateley nadezhnosti portovykh peregruzochnykh mashin v ekspluatatsionnykh usloviyakh [Assessment of quantitative values of reliability indicators of port transshipment machines in operating conditions]. Ekspluatatsiya morskogo transporta №1 (102), 2022, 12-15 s.
14. Ablyazov E.K., Deruzhinskiy G.V., Ablyazov K.A. Otsenka nadezhnosti bystrovosstanavlivaemykh elementov peregruzochnykh mashin i mekhanizmov [Assessment of the reliability of quickly restored elements of reloading machines and mechanisms]. (2021), Journal of Physics: Conference Series, 2061 (1), stat'ya № 012085

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аблязов Эмиль Кемалович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и комплексы», «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова», 353924, Краснодарский Край, г.Новороссийск, пр. Ленина, д. 93.
e-mail: amigab@mail.ru

Emil K. Ablyazov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Lifting and transport machines and complexes, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Lenin's avenue, 93 bodies, Russian Federation, e-mail: amigab@mail.ru

Аблязов Кемал Абдуллаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и комплексы», «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова», 353924, Краснодарский Край, г.Новороссийск, пр. Ленина, д. 93.
e-mail: kiril123@bk.ru

Kemal A. Ablyazov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Lifting and transport machines and complexes, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossisk, Lenin's avenue, 93 bodies, Russian Federation, e-mail: kiril123@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 21.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2023.

Научная статья

УДК 004.9:336.71:332.1

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.029>

Алгоритмы высокопроизводительной рекуррентной аффинной обработки данных и сигналов и метод улучшения локальности ввода-вывода

Чусов А.А.¹ chusov.aa@dvfu.ru, Чусова А.Е.¹ chusova.ae@dvfu.ru, Смадыч Н.С.¹ smadych.ns@students.dvfu.ru¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. В работе представлены метод кастомизации локальности ввода-вывода при реализации высокопроизводительных методов обработки сигналов и данных на основе рекуррентных аффинных преобразований, а также обоснование параллельных алгоритмов такой обработки, включая векторный алгоритм, основанный на предлагаемом методе, с улучшенной локальностью доступа.

Приведено формальное обоснование предложенного метода, использующее методы абстрактной алгебры, что делает метод применимым для широкого круга задач обработки сигналов и данных на основе рекуррентного аффинного преобразования. Применимость предложенного алгоритма обусловлена его принадлежностью классу «одна программа-множество данных», который реализуется широким набором вычислительных устройств, включая векторные, сигнальные и графические мультимикропроцессоры, вследствие относительной простоты организации и управления потоками выполнения.

Использование предложенных метода и алгоритма показано на примерах генерации псевдослучайных чисел, реализации линейных и аффинных сдвиговых регистров с обратной связью, а также метода реализации блочного шифрования двумерных данных с помощью аффинных шифров, применяемых в современных методах сокрытия конфиденциальных изображений.

Представленные результаты экспериментальных измерений показывают состоятельность и значительно большую, по сравнению с новейшими альтернативами, оперативность даже последовательной реализации, а также масштабируемость параллельного алгоритма с улучшенной локальностью доступа.

Ключевые слова: высокопроизводительная обработка данных, цифровая обработка сигналов, параллельные алгоритмы, ОПМД-параллелизм, аффинные преобразования, локальность доступа, криптография, визуальная криптография.

Финансирование: Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008

Для цитирования: Чусов А.А., Чусова А.Е., Смадыч Н.С. Алгоритмы высокопроизводительной рекуррентной аффинной обработки данных и сигналов и метод улучшения локальности ввода-вывода. 2023. № 4 часть 1, С. 242—250. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.029

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.029>

Algorithms for high-performance recurrent affine data and signal processing and a method of improving its input-output locality

Andrey A. Chusov¹ chusov.aa@dvfu.ru, Alina E. Chusova¹ chusova.ae@dvfu.ru,Nikita S. Smadych¹ smadych.ns@students.dvfu.ru¹Far Eastern Federal University

Abstract. The paper proposes a new method for customizing patterns of input-output access to data in order to improve its locality in implementations of high-performance signal and data processing based on recurrent affine transformation. This method is implemented in a proposed parallel algorithm with improved data locality which, together with alternative methods of parallelization, is formally described and presented in the paper. The formalism is expressed in terms of abstract algebraic structures and as such the method is applicable to a wide range of data and signal processing problems which are based on the recurrent affine transform. The applicability of the proposed algorithm is derived from its “single program-multiple data” class of parallel problems and implementing architectures. The latter are widespread due to relative simplicity of their implementation compared to other classes which require separate management of parallel threads of execution. These architectures include, for example, vector, signal and graphical multiprocessors.

Use of the proposed method and algorithm, as an example, is specified in the paper for the problems of parallel generation of pseudorandom numbers, parallel implementation of linear and affine feedback registers as well as a parallel implementation of affine block and stream ciphers based on the recurrent affine transform which are employed in modern algorithms of confidential image encryption.

The results of experimental research demonstrate efficiency and scalability of the proposed parallel algorithm which significantly outperform the newest alternatives.

Keywords: high-performance data processing, digital signal processing, parallel algorithms, SPMD-parallelism, affine transformation, data locality, cryptography.

Financial Support: This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia in the field of scientific activities under the project № FZNS-2023-0008

For citation: Andrey A. Chusov, Alina E. Chusova, Nikita S. Smadych, Algorithms for high-performance recurrent affine data and signal processing and a method of improving its input-output locality. 2023. № 4 part 1, P. 242—250. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.029

Введение

Аффинные отображения $f(x): S_1 \rightarrow S_2$, где S_1 и S_2 – векторные пространства, определяются над некоторым алгебраическим полем F так, что

$$\forall x \forall y [(xy) \in S_1^2 \Rightarrow f(x - y) = f(x) - f(y)], \quad (1)$$

и отображение $x - y \mapsto f(x - y)$ является линейным – находят применение в широком спектре задач машинной обработки сигналов и данных, имитационном и численном компьютерном моделировании, реализации составных задач межмашинного взаимодействия и телекоммуникаций. В частности, области применения аффинных отображений включают в себя следующие задачи: криптография (аффинные шифры, аффинные трансформации в функциях шифрования современных блочных шифров [1-5], сдвиговые регистры с обратной связью [6-11]), помехоустойчивое кодирование данных [12-13] (линейные коды, коды Рида-Соломона, коды CRC, турбокоды), компьютерной графике [14] (операции переноса, масштабирования, поворота, отражения изображения), компьютерном зрении [15], компьютерном моделировании [16-19] (генерация шума, метод Монте-Карло и эвристические алгоритмы).

Трудоемкость решения соответствующих задач обусловлена объемом обрабатываемых данных, степенью детализации компьютерных моделей и, таким образом, требованиями к результативности решаемых задач, которые растут вследствие увеличения объемов хранимых, передаваемых и обрабатываемых данных, требований к адекватности моделей.

Улучшение обусловленных трудоемкостью показателей функциональной эффективности решения указанных задач, таких как оперативность и энергоэффективность, сегодня опирается в основном на повышение масштабируемости их реализаций – эффективности одновременного решения составной задачи множеством элементарных, универсальных или специализированных, параллельно работающих устройств, то есть за счет создания применения масштабируемых параллельных алгоритмов [20-21].

1. Математическое обоснование

Пусть $S_1 = S_2$ в (1) – векторные пространства, определенные над полем F со сложением и умножением и с 0 и 1 в качестве соответствующих нейтральных элементов. Тогда отображение f может быть представлено в виде

$$f(x): S_1 \rightarrow S_2: x \mapsto Ax + B \quad (2)$$

для некоторых $A \in F^{\dim(S_1) \times \dim(S_2)}$ и $B \in S_2$. Действительно, из (1) непосредственно следует существование $B: f(x) - f(y) = f(x - y) \Leftrightarrow \exists b \exists B [B = f(x) - f(y) \in F_2 \wedge b \in \{\beta \in F_1 | f(\beta) = B\} \Rightarrow f(x) = f(y) + B = f(x + b)]$, то есть $x - b \mapsto f(x) - B$ является линейным отображением (по

определению аффинного отображения), из чего следует существование A .

Если отображение (1) обратимо, оно является гомоморфным аффинным преобразованием. Аналогичным образом линейному отображению в настоящей работе противопоставляется линейное преобразование.

Множество всех аффинных преобразований $f = (A, B)$ для всех $A \in GL(n, F)$ и $B \in F^n$ в (2), где $GL(n, F)$ – где генерализованная линейная группа обратимых матриц из $F^{n \times n}$, образует собой некоммутативную группу $\mathcal{F}$ с операцией композиции

$$\circ: \mathcal{F}^2 \rightarrow \mathcal{F}: (A_2, B_2), (A_1, B_1) \mapsto (A_2, B_2) \circ (A_1, B_1) = (A_2 A_1, A_2 B_1 + B_2). \quad (3)$$

Действительно, определение (2) показывает замкнутость и ассоциативность операции, а также существование нейтрального элемента $(1, 0)$, где $1 \in F^{n \times n}$ и $0 \in F^n$, и инверсии $(A, B)^{-1} = (A^{-1}, -A^{-1} \cdot B)$.

Если поле F конечно, и число элементов в нём равно $q = \text{ord}(F)$, то порядок группы $\mathcal{F}$ равен произведению порядка группы $GL(n, F)$ и числа возможных B , то есть

$$\text{ord}(\mathcal{F}) = |F^n| \cdot \text{ord}(GL(n, F)) = q^n \cdot \prod_{i=1}^{n-1} (q^n - q^i). \quad (4)$$

Классические алгоритмы, предполагающие обработку сигналов и данных, а также алгоритмы, выполняющие циклическую генерацию данных, предполагают некоторую цикличность. Такими, например, являются подстановки AES, выполняемые над словами в рамках процедуры SubBytes [4], операции над точками при выполнении графических трансформаций, умножение блоков входных данных, которые умножаются на матрицы-генераторы линейных помехоустойчивых кодов, а также на проверочные матрицы при генерации соответствующих синдромов [22], операции над полиномами линейных и аффинных сдвиговых регистров с обратной связью, линейные конгруэнтные и производные от него генераторы псевдослучайных данных.

Например, использование сдвиговых регистров с обратной связью, пример которых показан на рисунке 1 для случая двоичного поля, для генерации псевдослучайной гаммы предполагает операции над элементами числового поля.

Во-первых, операция перехода n -элементного регистра из состояния в состояние может быть выражена линейной операцией умножения на матрицу перехода $A \in GL(n, F)$ и, в случае если используется регистр с комплементарией результатов кольцевого сложения (операция XNOR в случае битовых полей [23], показанная на рис. 1), дополнительного прибавления к результату вектора B , первые $n - 1$ строк которого содержат максимальный элемент числового поля F , и это прибавление делает операцию аффинной и нелинейной. Последняя строка матрицы A кодирует обратную связь (R_1 и R_2 на рис. 1) путем

расположения ненулевых элементов в столбцах, позиции которых соответствуют элементам регистра, участвующих в формировании обратной связи.

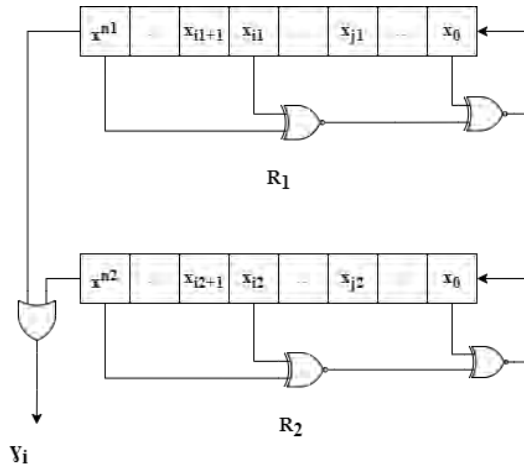


Рис. 1. Генерация гаммы с помощью двоичных аффинных сдвиговых регистров с обратной связью

Последний элемент вектора B является нулевым. Таким образом i -тое состояние X_i регистра задается значением

$$X_i = AX_{i-1} + B = A^i X_0 + \sum_{k=0}^{i-1} A^k B = A_i X_0 + B_i, \quad (5)$$

где X_0 – стартовое значение и $A^0 = 1$ – единичная матрица.

Во-вторых, операция извлечения i -го элемента гаммы из регистра (3) является линейным отображением и определяется умножением состояния слева на вектор-строку $\mu_n = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \in F^{1 \times n}$ для реализации отображения $F^n \rightarrow F$. Поэтому, если генератор гаммы представлен N регистрами с параметрами $A^{(k)}, B^{(k)}$, n_k и $X_0^{(k)}$ ($0 \leq k < N$), то i -тый элемент гаммы оказывается равным результату отображения $\mu^*: F^{\sum_{k=0}^{N-1} n_k} \rightarrow F$, которое также оказывается аффинным (2):

$$\begin{aligned} y_i &= \mu^*(X^*) \sum_{k=0}^{N-1} \mu_{n_k} (A^{(k)} X_i^{(k)} + B^{(k)}) \\ &= [\mu_{n_0} \dots \mu_{n_{N-1}}] \begin{bmatrix} A^{(0)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A^{(1)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A^{(N-1)} \end{bmatrix}^i \begin{bmatrix} X_0^{(0)} \\ X_0^{(1)} \\ \dots \\ X_0^{(N-1)} \end{bmatrix} \\ &+ [\mu_{n_0} \dots \mu_{n_{N-1}}] \sum_{t=0}^{i-1} \begin{bmatrix} A^{(0)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A^{(1)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A^{(N-1)} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} B^{(0)} \\ B^{(1)} \\ \dots \\ B^{(N-1)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку все $A^{(k)} \in GL(n, F)$, операция (3) оказывается аффинным преобразованием, а (6) – необратимым, при $n > 1$, аффинным отображением.

Выражение (3) рекуррентно и в настоящей работе называется рекуррентным аффинным преобразованием, которое образовано композицией i аффинных преобразований (A, B) , то есть

$$X_i = (A, B)^i(X_0), \quad (7)$$

где $(A, B)^i \in \mathcal{F}_{(A, B)} \subseteq \mathcal{F}$, $\mathcal{F}_{(A, B)}$ – циклическая подгруппа $\mathcal{F}$, число элементов которой, согласно теореме Лагранжа, является делителем (4).

Наиболее простая реализация алгоритмов рекуррентного аффинного преобразования обрабатывает элементы данных циклически, вычисляя результаты на основе предыдущих (рис. 2).

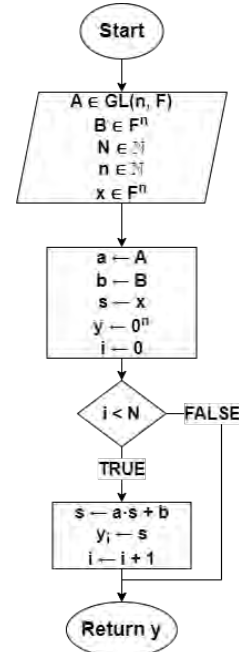


Рис. 2. Последовательный алгоритм аффинного преобразования

Основное преимущество данного подхода – простота и отсутствие требований к хранению начального состояния X_0 , если умножение на A и прибавление B можно выполнить на месте. Однако данный подход вводит существенные ограничения на реализуемость рекуррентных аффинных преобразований, обусловленные зависимостями по данным, из-за чего параллельная реализация преобразований оказывается невозможной.

Однако эти проблемы устранимы, если для вычисления X_i опираться на (7), поскольку в этом случае результат вычисления зависит только от параметров A и B алгоритма обработки, а также от инвариантного начального состояния X_0 .

Кроме этого, вследствие ассоциативности операций в группах справедливы обычные тождества, относящиеся к возведению в целочисленную степень:

$$\forall p_1 \forall p_2 \forall f[(p_1 p_2) \in \mathbb{Z} \Rightarrow f^{p_1+p_2} = f^{p_1} \circ f^{p_2} \wedge f^{p_1 p_2} = (f^{p_1})^{p_2}]. \quad (8)$$

2. Параллельные алгоритмы рекуррентных аффинных преобразований

Тождества (8) дают возможность параллельной реализации аффинных преобразований. Первый, основанный на распараллеливании Round-Robin (рис. 3), исследованный метод такой реализации предполагает построение таблицы стартовых

состояний, то есть пар $f_t = (A, B)^{t+1}$ для каждого потока из T параллельного выполнения, $0 \leq t < T$. Это дает возможность потоку выполнения t выполнять преобразования f_t^{kT} над элементами данных с индексами $t + kT$ для всех $k \in \mathbb{N}_0$ (рис. 3).

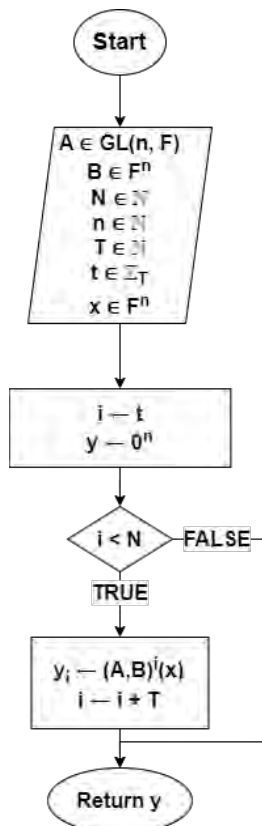


Рис. 3. Алгоритм параллельного аффинного преобразования, реализуемый потоком выполнения t из общего числа потоков T и основанный на методе распараллеливания Round-Robin

Вместе с тем представленная на рис. 3 реализация требует произвольного доступа к элементам памяти y_i . Один поток выполнения должен быть в состоянии с минимальными издержками во времени и ресурсоемкости осуществить доступ на запись элемента y_i и, сразу после этого, элемента y_{i+T} . Если потоки выполняют алгоритм синхронно, например используя единый указатель на выполняемую инструкцию, то вся система потоков должна иметь доступ на запись элементов выходного вектора, находящихся на расстоянии $T \cdot (T - 1) = O(T^2)$ друг от друга. В более общем случае, когда указанной синхронности выполнения не гарантируется, и поведение потоков во времени не детерминировано, расстояние при таком доступе может расти неограниченно.

Это, во-первых, ограничивает применимость алгоритма: например, в случае мультипоточковой передачи данных квадратичное число этих потоков данных может быть нереализуемым практически.

Во-вторых, даже если возможен доступ ко всем передаваемым данным целиком, например, в результате их буферизации, эффективность такого доступа часто оказывается низкой вследствие ограничения сверху эффективности операций ввода-вывода, обусловленных пространственной и

временной локальностью данных, особенно при наличии кэш-памяти, и эти ограничения часто определяющим образом сказываются на оперативности реализации в целом [21-22].

Поэтому в настоящей работе предлагается *альтернативный* метод аффинной обработки (рис.4), основанный на том факте, что для полугрупп с нейтральным элементом вследствие (8) применим алгоритм быстрого двоичного возведения в целочисленную степень p , имеющего относительно небольшую сложность $O(\log_2 p)$.

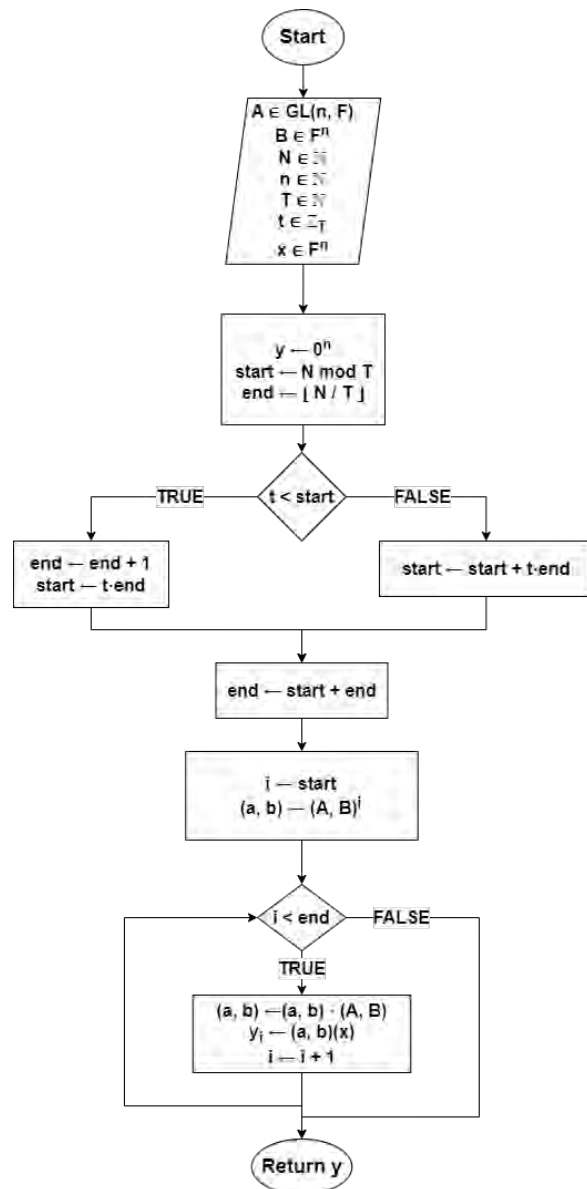


Рис. 4. Алгоритм аффинного преобразования, основанный на принципе локальности данных

Тогда, если требуется выполнение преобразований вида (5) над N элементами входных данных, гораздо большую оперативность обеспечивает параллельный алгоритм, в котором во время выполнения поток t обрабатывает элементы входных данных в интервале $[b, b + s)$, где

$$s = \begin{cases} \left\lceil \frac{N}{T} \right\rceil + 1, & \text{если } t \leq N \bmod T \\ \left\lceil \frac{N}{T} \right\rceil, & \text{если } t > N \bmod T \end{cases}, \quad (9)$$

и

$$b = \begin{cases} st, & \text{если } t \leq N \bmod T \\ st + N \bmod T, & \text{если } t > N \bmod T \end{cases} \quad (10)$$

Тогда обеспечивается локальность доступа к данным и отсутствие условий ложного разделения в системах с общей памятью, а при мультипоточковой передаче данных необходимо лишь T потоков данных для работы системы в целом.

3. Экспериментальное измерение эффективности

Эффективность предложенных метода и алгоритмов высокопроизводительной аффинной обработки данных была измерена экспериментально на двух примерах: реализации линейного конгруэнтного генератора псевдослучайных чисел, а также на примере реализации блочного симметричного шифрования двумерных изображений на основе шифра Хилла.

Программная реализация обоих экспериментов доступна читателю в GIT репозитории по Интернет-адресу https://gitlab.com/lpsztemp/affine-transform-paper/-/tree/v2?ref_type=tags для верификации результатов.

3.1. Высокопроизводительная реализация линейного конгруэнтного генератора

Для экспериментальных измерений был реализован линейный конгруэнтный генератор $\mathbb{Z}_M: X \rightarrow AX + B$ с параметрами $A = 0x41c64e6d$, $B = 12345$ и $M = 2^{31}$, эквивалентный генератору `rand/rand`, работающему в режиме линейного конгруэнтного, который задается функцией `setstate`, стандартной библиотеки GNU C новейшей версии `glibc 2.38`. Реализация построена с использованием новейшей версии 13.2 компилятора GCC.

Аппаратно эксперимент выполнен с использованием микропроцессора Intel Core i9-10980XE с 36 логическими и 18 физическими ядрами и размерами кеш памяти L1 32 КиБ/ф.я. (для данных и инструкций) и L2 1 МиБ/ф.я. (ф.я. – физическое ядро), а также общей L3 размером 24.75 МиБ.

Результаты измерений времени, в миллисекундах, в зависимости от количества 32-битовых элементов данных (то есть количества элементарных аффинных преобразований) представлены на рис. 5.

Во всех случаях для генерации использовано разное значение стартовой последовательности X_0 во избежание кеширования данных между экспериментами.

График «GNU C time» показывает измеренную оперативность реализации библиотеки GNU C; график «Serial time» отображает оперативность последовательной реализации (7); график «Round-robin parallel» – оперативность реализации первого параллельного алгоритма с низкой локальностью доступа (рис. 3); график «Cache-optimized parallel time» – оперативность предложенного альтернативного параллельного алгоритма аффинной обработки данных (рис. 4). Все параллельные реализации для генерации результатов, представленных на рис. 5,

использовали все 36 логических ядер мультимикропроцессора.

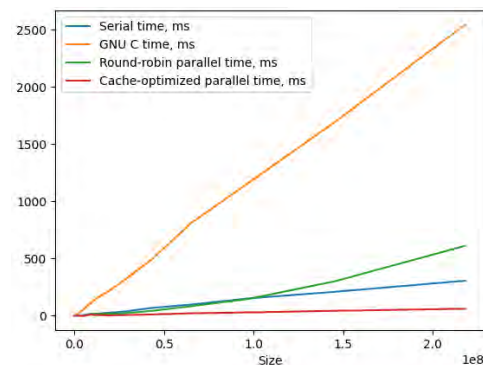


Рис. 5. Эффективность реализаций линейного конгруэнтного генератора, построенных на основе (7) в сравнении с реализацией библиотеки GNU C.

На графиках очевидна, во-первых, значительно большая оперативность всех реализаций, использующих (7), по сравнению с той, которая реализуется стандартной библиотекой GNU C. Во-вторых, эксперименты показали значительно большую оперативность предложенного альтернативного метода распараллеливания с улучшенной локальностью доступа, показанного на рис. 4.

Эффективность непосредственно распараллеливания, выраженная ускорением, то есть отношением времени, затраченного на последовательную аффинную обработку, ко времени, которое затрачено параллельной реализацией, использующей T ядер указанного выше процессора ($1 \leq T \leq 36$), показана на рис. 6.

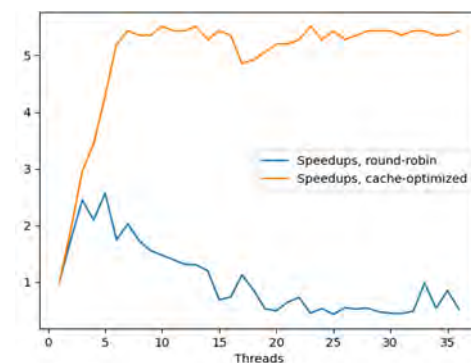


Рис. 6. Масштабируемость параллельных реализаций линейного конгруэнтного генератора 2^{28} элементов из $\mathbb{Z}_{2^{31}}$.

График «Speedups, round-robin» показывает ускорения, достигнутые при использовании алгоритма с низкой локальностью данных (рис. 3). График «Speedups, cache-optimized» показывает ускорения, полученные при использовании альтернативного алгоритма (рис. 4) с улучшенной локальностью.

На графиках видно, что последний оказывается значительно более масштабируемым, однако эффективность оказывается далекой от идеальной: максимальные показатели эффективности достигаются при использовании лишь 6 ядер мультимикропроцессора из 18 доступных физических ядер.

Это объясняется относительно низкой «полезной» нагрузкой при генерации, заключающейся в выполнении лишь одного скалярного умножения и одного сложения на каждой итерации цикла обработки данных. Также отметим некоторое падение масштабируемости при использовании 18 ядер, что объясняется использованием симметричной мультипотокowości.

3.2. Высокопроизводительная реализация блочного шифрования изображений

Данный эксперимент был реализован по результатам анализа алгоритмов шифрования, предложенных в [1-3]. В работах [1] и [2] для непосредственно шифрования изображений после скремблирования используется известный шифр Хилла, который осуществляет линейное преобразование

$$GL(n, F) \times F^{n \times m} \rightarrow F^{n \times m}: K, p \mapsto Kp = c, \quad (11)$$

где K – обратимая ключевая матрица, p – открытый текст, и c – шифротекст. Например, в [1] это отображение используется на шаге 5-й предложенного авторами алгоритма для индивидуального шифрования блоков пикселей размера 4×4 , то есть $n = m = 4$ в (11).

Известным недостатком шифров Хилла является их уязвимость к атакам на основе известного или заданного открытого текста, а также на основе заданного шифротекста [3], поскольку, если известный открытый текст принадлежит $GL(n, F)$, то задача компрометации ключа шифрования решается тривиально: $K = cp^{-1}$. С учётом того, что в [1] все предварительные шаги предложенного авторами алгоритма выполняют хаотичное скремблирование, этот алгоритм оказывается уязвимым к атакам на основе заданного открытого текста.

Поэтому имеет смысл установить зависимости по данным при реализации шифрования изображений и использовать режим шифрования с обратной связью. В [2] это шифрование выполняется в режиме CBC, который устанавливает зависимости результатов шифрования последующих блоков данных от результатов шифрования предыдущих.

Очевидными и известными недостатками таких режимов шифрования являются, во-первых, отсутствие каких-либо возможностей по распараллеливанию обработки данных, что актуально при больших объемах этих данных, а также в условиях требований к оперативности, например, при потоковой передаче данных; во-вторых, недостатком является распространение единичных ошибок в блоках данных на последующие блоки: например ошибки единичных символов, возникающие в зашумленной среде передачи данных, приводят к невозможности восстановления всех последующих блоков переданного шифротекста.

Эти недостатки решаются использованием режимов шифрования, которые устанавливают зависимости путем эмуляции поведения потоковых шифров с генераторами гаммы, исключая таким образом зависимости от результатов шифрования предыдущих блоков. Известным примером такого шифрования является режим OFB, который при использовании шифра Хилла вычисляет блоки шифротекста следующим образом:

$$c_i = p_i + V \cdot K^i = p_i + (K, 0)^i(V), \quad (12)$$

где V – вектор инициализации, и $(A, B)(x) = x \cdot A + B$, поскольку в данном эксперименте умножение на A , в отличие от (7), осуществляется справа, как это определено в [1]. Из этого выражения видно, что при постулируемом в соответствии с принципом Керкгоффса знании атакующей стороной открытого текста p_i , но секретном значении V , атака сводится к факторизации правого слагаемого. Однако, если значение V скомпрометировано, получение ключа K не составляет труда, поскольку существует множество эффективных алгоритмов вычисления корня в группах.

Кроме этого, режим OFB недостаточно скрывает корреляцию между блоками изображения, что достаточно отчетливо наблюдается при анализе изображения-шифротекста (рис. 7).

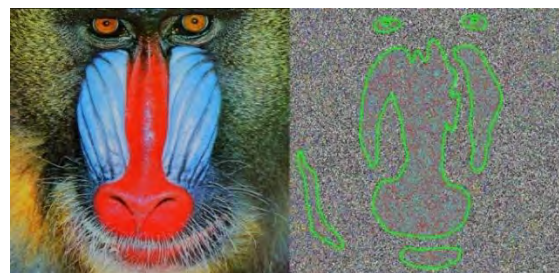


Рис. 7. Наблюдаемая корреляция некоторых участков шифротекста, полученная в результате использования шифра Хилла в режиме OFB (справа) с участками открытого текста (слева). Зелеными линиями искусственно обведены границы наблюдаемых участков.

Выражение (7) позволяет сформулировать алгоритм шифрования, который несколько увеличивает стойкость к атакам на основе известного и заданного открытого текста или на основе заданного шифротекста, а также скрывает корреляцию участков данных, которая наблюдается на рис. 7:

$$c_i = p_i K^i + V \sum_{j=1}^i K^j = (K, V \cdot K)^i(p_i), \quad (13)$$

где, опять же, умножение на K выполняется в рамках эксперимента справа для соответствия [1].

Тогда задача атаки такого шифра в наихудшем случае знания атакующим вектора инициализации V сводится к задаче полиномиальной факторизации, а в случае секретного V – к более сложной задаче факторизации элементов группы $\mathcal{F}$ в (3).

В рамках настоящей работы выполнена реализация обоих, (12) и (13), режимов шифрования с помощью алгоритма с улучшенной локальностью данных (см. рис. 4). Выполнялось шифрование изображения BITMAP разрешения FullHD (1920x1080 пикселей) формата RGB24 без сжатия.

Аналогично методам, описанным в [1-3], для аффинного преобразования использовалось правое умножение на ключ, каждая цветовая плоскость шифровалась независимо, блоками 4×4 , и затем объединялась в единый трехцветовой пиксель формата RGB24.

Один 8-битовый символ цвета рассматривался как элемент поля $F = GF(2^8)/x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$.

Для аппаратной реализации шифрования использовались два 12-ядерных микропроцессора

Intel Xeon E5-2695 v2 с совокупным количеством логических ядер, равным 48.

Виден заметный прирост масштабируемости параллельных реализаций по сравнению с результатами предыдущего эксперимента и её близость к максимальной до момента использования симметричной мультипотокости.

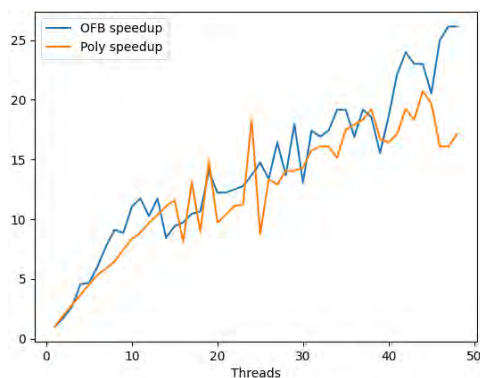


Рис. 8. Наблюдаемые ускорения при шифровании изображения RGB24 разрешением 1920x1080 пикселей с помощью алгоритма с улучшенной локальностью доступа на основе отображений (5) («OFB speedup») и (6) («Poly speedup»).

Шифрование, использующее (13), лишь незначительно уступает в масштабируемости реализации (12), при большем количестве действий и обладает указанными преимуществами в результативности.

Заключение

Таким образом, экспериментально показана и теоретически обоснована, во-первых,

состоятельность предложенного метода реализации рекуррентных аффинных преобразований на основе (7), а также их оперативность в сравнении с традиционной реализацией, представленной на рис. 2, а также библиотекой GNU C с новейшей версии.

Во-вторых, экспериментально показана и теоретически обоснована масштабируемость предложенных параллельных форм алгоритма, показана оперативность и масштабируемость предложенной параллельной формы алгоритма рекуррентного аффинного преобразования с улучшенной локальностью данных (рис. 4).

Экспериментально была исследована эффективность предложенных методов рекуррентного аффинного преобразования, конкретизированного для задачи генерации псевдослучайных данных с помощью рекуррентного аффинного преобразования, а также блочного шифрования двумерных изображений на примерах двух режимах.

Эксперименты показали, во-первых, предсказанный прирост эффективности аффинного преобразования и, во-вторых, резко положительное влияние локальности по данным параллельной реализации на её эффективность. Прирост эффективности более заметен при увеличении трудоемкости аффинной обработки, то есть увеличении количества обрабатываемых данных, по сравнению с элементарными операциями, представленными в (2) и (5). Вместе с тем при неизменном количестве обрабатываемых данных и элементарных аффинных преобразований одинаково во всех реализациях составных алгоритмов, использующих аффинные отображения, поэтому прирост оперативности ожидается во всех этих случаях.

Литература

1. Lone M.A., Qureshi S. RGB image encryption based on symmetric keys using Arnold transform, 3D chaotic map and affine hill cipher. *Optik*. 2022. Vol. 260. P. 1-13. doi: 10.1016/j.ijleo.2022.168880
2. J. R. Paragas, A. M. Sison and R. P. Medina. An Improved Hill Cipher Algorithm using CBC and Hexadecimal S-Box. 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE). Yunlin. 2019. pp. 77-81. doi: 10.1109/ECICE47484.2019.8942717
3. Ferreira M. Implementing and Evaluating Nonsingular Matrices Generators for the Hill Cipher. Ph.D. dissertation. Universidade da Beira Interior, Portugal, 2018.
4. Advanced Encryption Standard (AES). Federal Information Processing Standards. 26 November 2001, doi: 10.6028/NIST.FIPS.197
5. ГОСТ 34.12-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2018. 20 с.
6. Wu, H. The Stream Cipher HC-128. In: *New Stream Cipher Designs*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. Vol 4986, pp 39–47. doi: 10.1007/978-3-540-68351-3_4
7. W. Li, X. Yang. A Parallel and Reconfigurable United Architecture for Fibonacci and Galois LFSR. 2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou. 2015, pp. 203-206. doi: 10.1109/IHMSC.2015.265
8. A.-N. Louay. Internal Affine Stream Cipher. *Computer Engineering and Information Technology Journal (CEITJ)*. 2014. Vol 1. pp.1-13.
9. C. Cid, J. P. Indrøy, H. Raddum. Fasta - a stream cipher for fast evaluation. In: *Topics in Cryptology – CT-RSA 2022*. Springer, Cham, 2022. Vol. 13161. pp. 451–483. doi: 10.1007/978-3-030-95312-6_19
10. W. S. Sayed, A. G. Radwan, H. A.H. Fahmy, A. Elseddek. Trajectory control and image encryption using affine transformation of lorenz system. *Egyptian Informatics Journal*. 2021. Vol. 22, № 2. pp. 155-166, <https://doi.org/10.1016/j.eij.2020.07.002>
11. M. Carenzo, M. Polak. Accelerating Multivariate Cryptography with Constructive Affine Stream Transformations. 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). Leipzig, Germany. 2019, pp. 221-225, doi: 10.15439/2019F277
12. S. V. Fedorenko. Efficient Algorithm for Finding Roots of Error-Locator Polynomials. In: *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 38673-38686. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063142

13. L. Peng. The Generation of Permutation Group Codes for Communication Systems. In: IEEE Transactions on Communications. 2019. Vol. 67, №. 7. pp. 4535-4549, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2902149
14. W. Mansour, R. Biv, C. Ponchut, R. Ponsard, N. Janvier, P. Fajardo. FPGA Based Real-Time Image Manipulation and Advanced Data Acquisition For 2D-XRAY Detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol. 68 . pp. 1927-1932.
15. Q. Shu, X. He, Ch. Wang, Yu. Yang. Parallel registration algorithm with arbitrary affine transformation. Chinese Optics Letters. 2020. Vol. 18. 071001. doi: 10.3788/COL202018.071001.
16. Meek C., Chickering D. M., Heckerman D. Autoregressive Tree Models for Time-Series Analysis. Proceedings of the Second SIAM International Conference on Data Mining, Arlington, USA, 2002. pp. 229–244.
17. Microsoft Time Series Algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/en-US/analysis-services/data-mining/microsoft-time-series-algorithm?view=asallproducts-allversions> (дата обращения: 10.08.2023).
18. Специальный курс Прикладные задачи анализа данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mkma.math.msu.su/media/uploads/2019/12/tinkoff-prikladnye-zadachi-analiza-dannyh-osen-2019.pdf> (дата обращения: 10.08.2023).
19. Скуднева О.В., Дубограй И.В. Применение аффинных преобразований пространства в моделировании механических систем на примере расчёта навигационных параметров гироскопических приборов // Инновационная наука. 2017. №2-1. С. 92-100.
20. Приёмы решения задач с кривыми второго порядка / В. В. Бурлов, Л. В. Ремонтова, В. В. Косолапов, Е. В. Косолапова // Программные системы и вычислительные методы. 2018. №1. С. 73-80.
21. Артемьева, И. Л., Чусова А. Е., Чусов А. А. Моделирование конкуренции за кэш в многоядерном процессоре // Вычислительные технологии и прикладная математика : Материалы II Международного семинара. Благовещенск. 2023. С. 22-24.
22. A. Lorenzon, A. Beck. Parallel Computing Hits the Power Wall: Principles, Challenges, and a Survey of Solutions. 2019. doi: 10.1007/978-3-030-28719-1
23. I.S. Reed, S. Gustave. Polynomial Codes over Certain Finite Fields. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1960. Vol. 8 (2), pp. 300–304, doi:10.1137/0108018
24. C. S. Vikranth, D. Mohammad, G. R. Somanathan, R. Bhakthavatchalu. Analysis of a Novel Reseeding Pattern Generator. 2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). 2021. Trichy, India. pp. 676-682, doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591905

References

1. Lone M.A., Qureshi S., RGB image encryption based on symmetric keys using Arnold transform, 3D chaotic map and affine hill cipher, Optik, Vol. 260, 2022, ISSN 0030-4026, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.168880.
2. J. R. Paragas, A. M. Sison and R. P. Medina, "An Improved Hill Cipher Algorithm using CBC and Hexadecimal S-Box," 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), Yunlin, Taiwan, 2019, pp. 77-81, doi: 10.1109/ECICE47484.2019.8942717.
3. Ferreira M. 2018. Implementing and Evaluating Nonsingular Matrices Generators for the Hill Cipher. Ph.D. Dissertation. Universidade da Beira Interior (Portugal). Advisor(s) Inácio, Pedro Ricardo Morais and Mileva, Inácio.
4. "Advanced Encryption Standard (AES)" (PDF). Federal Information Processing Standards. 26 November 2001, doi: 10.6028/NIST.FIPS.197.
5. GOST 34.12-2018 Informacionnaja tehnologija. Kriptograficheskaja zashhita informacii. Blochnye shifry : nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. [GOST 34.12-2018 Information technology. Cryptographic information protection. Block ciphers: national standard of the Russian Federation]. – Moscow, 2018.
6. Wu, H. The Stream Cipher HC-128. In: New Stream Cipher Designs. Lecture Notes in Computer Science, vol 4986. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-68351-3_4.
7. W. Li, X. Yang, "A Parallel and Reconfigurable United Architecture for Fibonacci and Galois LFSR," 2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Hangzhou, China, 2015, pp. 203-206, doi: 10.1109/IHMSC.2015.265.
8. A.-N. Louay. (2014). Internal Affine Stream Cipher. Computer Engineering and Information Technology Journal (CEITJ). 01.
9. C. Cid, J. P. Indrøy, H. Raddum. Fasta - a stream cipher for fast evaluation. Cryptology ePrint Archive, Paper 2021/1205, 2021. <https://eprint.iacr.org/2021/1205.pdf>
10. W. S. Sayed, A. G. Radwan, H. A.H. Fahmy, A. Elsedek, Trajectory control and image encryption using affine transformation of lorenz system, Egyptian Informatics Journal, Volume 22, Issue 2, 2021, Pages 155-166, <https://doi.org/10.1016/j.eij.2020.07.002>.
11. M. Carenzo, M. Polak, "Accelerating Multivariate Cryptography with Constructive Affine Stream Transformations," 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Leipzig, Germany, 2019, pp. 221-225, doi: 10.15439/2019F277. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8860022>
12. S. V. Fedorenko, "Efficient Algorithm for Finding Roots of Error-Locator Polynomials," in IEEE Access, vol. 9, pp. 38673-38686, 2021.
13. L. Peng, "The Generation of Permutation Group Codes for Communication Systems," in IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 7, pp. 4535-4549, July 2019, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2902149.
14. FPGA Based Real-Time Image Manipulation and Advanced Data Acquisition For 2D-XRAY Detectors Wassim Mansour, Rattana Biv, Cyril Ponchut, Raphael Ponsard, Nicolas Janvier and Pablo Fajardo <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2010/2010.15450.pdf>

15. S. Qin, H. Xiuli, W. Chang, Y. Yunxiu. Parallel registration algorithm with arbitrary affine transformation. Chinese Optics Letters. Volume 18. 2020. 10.3788/COL202018.071001.
16. Meek C., Chickering D. M., Heckerman D. Autoregressive Tree Models for Time-Series Analysis // Proceedings of the Second International SIAM Conference on Data Mining. 2002. 600 p.
17. Microsoft Time Series Algorithm URL: <https://learn.microsoft.com/en-US/analysis-services/data-mining/microsoft-time-series-algorithm?view=asallproducts-allversions>.
18. Prikladnye zadachi analiza dannyh [Applied data analysis tasks]. URL: <https://ru.coursera.org/learn/data-analysis-applications>.
19. Skudneva O.V., Dubograj I.V. Primenenie affinnyh preobrazovaniy prostranstva v modelirovanii mehanicheskikh sistem na primere raschyota navigacionnyh parametrov giroskopicheskikh priborov [Application of affine space transformations in the modeling of mechanical systems by the example of calculating the navigation parameters of gyroscopic devices]. Innovacionnaya nauka. 2017. №2-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenienie-affinnyh-preobrazovaniy-prostranstva-v-modelirovanii-mehanicheskikh-sistem-na-primere-raschyota-navigatsionnyh-parametrov>.
20. Burlov Vladimir Vasil'evich, Remontova Ljudmila Viktorovna, Kosolapov Vladimir Viktorovich, Kosolapova Elena Valentinovna. Priyomy resheniya zadach s krivymi vtorogo porjadka [Techniques for solving problems with second-order curves]. Programmye sistemy i vychislitel'nye metody. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/priyomy-resheniya-zadach-s-krivymi-vtorogo-poryadka>.
21. I. L. Artem'eva, A. E. Chusova, A. A. Chusov. Modelirovanie konkurencii za klesh v mnogojadernom processore [Modeling cache contention in a multicore processor]. Vychislitel'nye tehnologii i prikladnaya matematika : Materialy II Mezhdunarodnogo seminara, Blagoveshhensk, 12–16 iyunja 2023 goda – Blagoveshhensk, 2023. – S. 22-24.
22. Lorenzon, Arthur & Beck, Antonio. (2019). Parallel Computing Hits the Power Wall: Principles, Challenges, and a Survey of Solutions. 10.1007/978-3-030-28719-1.
23. Reed I.S., Gustave S., "Polynomial Codes over Certain Finite Fields". Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 8 (2): cc. 300–304, 1960, doi:10.1137/0108018.
24. C. S. Vikranth, D. Mohammad, G. R. Somanathan and R. Bhakthavathalu, "Analysis of a Novel Reseeding Pattern Generator," 2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), Trichy, India, 2021, pp. 676-682, doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591905

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чусов Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и средств связи, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, e-mail: smadych.ns@students.dvfu.ru

Andrey A. Chusov, Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronics and Communications, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, e-mail: smadych.ns@students.dvfu.ru

Чусова Алина Евгеньевна, ассистент Департамента программной инженерии и искусственного интеллекта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10 e-mail: chusova.ae@dvfu.ru

Alina E. Chusova, assistant of the Department software engineering and artificial intelligence, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: chusova.ae@dvfu.ru

Смадыч Никита Сергеевич, магистрант Департамента электроники и средств связи, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: smadych.ns@students.dvfu.ru

Nikita S. Smadych, master's student of the Department of Electronics and Communications, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation, e-mail: smadych.ns@students.dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.11.2023.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 65.01

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.030>

Управление проектами в судостроительной отрасли

Кузнецова М.Н.¹ kuznetsova@narfu.ru, Васильева А.С.¹ a.vasileva@narfu.ru

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова

Аннотация. Автоматизация производства путем использования современных систем управления проектами обеспечивает конкурентоспособность промышленных предприятий. Механизм управления проектами предприятия определяется в зависимости от организационной структуры, масштабов деятельности предприятия, стратегии его развития, содержания проектов. Целью исследования является изучение вопросов управления проектами судостроительной отрасли. Основой исследования стали труды отечественных и зарубежных авторов в данной области знаний. В работе рассмотрены теоретические вопросы, касающиеся управления проектами, место и роль управления портфелем проектов на судостроительном предприятии, выявлены достоинства и недостатки существующих систем управления проектами. Дана характеристика системы управления проектами на конкретном предприятии и проведен её анализ, представлены методические рекомендации по совершенствованию процедуры управления проектами. Достоверность расчетов подтверждена количественными методами. Результаты исследования имеют прикладное значение, способствуют построению системы управления проектами на судостроительном предприятии.

Ключевые слова: Судостроение, управление, проект, портфель проектов, анализ, методика оценки проекта, показатели, эффективность проекта

Для цитирования: Кузнецова М.Н., Васильева А.С. Управление проектами в судостроительной отрасли, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 251—262. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.030

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.030>

Project management in the shipbuilding industry

Marina N. Kuznetsova¹ kuznetsova@narfu.ru, Anastasia S. Vasilyeva¹ vasileva@narfu.ru

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract. Automation of production through the use of modern project management systems ensures the competitiveness of industrial enterprises. The mechanism of enterprise project management is determined depending on the organizational structure, the scale of the enterprise, its development strategy, and the content of projects. The purpose of the study is to study the issues of project management in the shipbuilding industry. The basis of the study was the works of domestic and foreign authors in this field of knowledge. The paper considers theoretical issues related to project management, the place and role of project portfolio management in a shipbuilding enterprise, and identifies the advantages and disadvantages of existing project management systems. The characteristics of the project management system at a particular enterprise are given and its analysis is carried out, methodological recommendations for improving the project management procedure are presented. The reliability of the calculations is confirmed by quantitative methods. The results of the study are of applied importance, they contribute to the construction of a project management system at a shipbuilding enterprise.

Key words: Shipbuilding, management, project, project portfolio, analysis, project evaluation methodology, indicators, project efficiency

For citation: Marina N. Kuznetsova, Anastasia S. Vasilyeva. Project management in the shipbuilding industry, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 251—262. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.030

Введение

Каждое судостроительное предприятие независимо от масштабов деятельности и сферы судостроения и судоремонта занимается разработкой и реализацией проектов. Проблема управления проектами возникает как на функциональном, так и организационном уровне.

Статья посвящена анализу системы управления проектами на промышленном предприятии с учетом особенностей судостроительной отрасли.

В работе рассмотрены теоретические вопросы по управлению проектами, роль управления портфелем проектов на судостроительном предприятии, проведен анализ существующей системы управления проектами и даны методические рекомендации по совершенствованию процедуры управления проектами.

1. Теоретические основы исследования

Основы управления проектами были заложены в начале XX века Ф. Тейлором и Г. Гантом. В своих научных работах Ф. Тейлор ввел понятие «управление», сформулировал принципы научной организации труда и менеджмента. Г. Гант изучал менеджмент на примере постройки кораблей и предложил диаграмму контроля и визуализации выполнения задач, названную позднее диаграммой Ганта. Этот инструмент управления проектами позволил планировать и создавать графики проектов, отслеживать последовательность выполнения работ, распределять ресурсы, контролировать процесс выполнения.

В настоящее время выделяют следующие этапы развития управления проектами в XX веке: 30-50 годы (зарождение), 60-е годы (внедрение методов сетевого планирования), 70-е годы (применение системного подхода), 80-е годы (сфера профессиональной деятельности), 90-е годы (новые направления в управлении проектами).

Изучению категорий «проект» и «портфель проектов» посвящены работы отечественных и зарубежных ученых.

Термин проект (в управленческой деятельности) (англ. *project*, от лат. *projectus* – брошенный вперед) – ограниченное во времени предприятие, которое направлено на создание уникального продукта, услуги или результата.

Мазур И.И. под проектом понимает краткосрочное предприятие, которое формируется с целью создания продукта или услуги в единственном виде, а также достижения конкретного результата [6, с.84]. Временный характер означает, что у любого проекта существует начало и завершение.

В работе [8, с.165] автор предлагает следующую трактовку: «проект – временное предприятие для создания уникального продукта, услуги или получения заданного результата».

Ручкин А.В. рассматривает проект как категорию, характеризующуюся следующими признаками: последовательный (скоординированный) комплекс мероприятий, обладающий уникальностью и ограниченностью ресурсов (временных, трудовых, финансовых) [10, с. 122].

В соответствии с ГОСТ Р 54869-2011 под проектом понимается «комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленный на создание уникального продукта или услуги в условиях временных и ресурсных ограничений» [3].

Резюмируя изложенное, можно констатировать, что под проектом понимается набор определенных целенаправленных, запланированных мероприятий с ограниченными ресурсами, направленных на создание продукта (услуги).

Объектом изучения является судостроительное предприятие, в частности судостроительный завод, включающий в себя не только судостроительную верфь, но и собственное машиностроительное производство. Поэтому введем два понятия «проект верфи», «проект судостроительного завода».

Проект верфи – «информационная модель, описывающая комплекс взаимосвязанных работ судостроительной верфи при строительстве или ремонте судна» [5, с. 148]. Проектом судостроительного завода является

информационная модель, описывающая не только комплекс взаимосвязанных работ верфи при строительстве или ремонте судна, но и работы, включающие машиностроительное производство.

Проекты отбираются и группируются в портфель проектов. В отличие от проекта, который имеет определенную конечную цель или конечный результат, портфель представляет собой более структурное обязательство по постоянной оптимизации распределения, приоритизации и планировании ресурсов в нескольких проектах.

Управление портфелем проектов (от англ. PPM – Project Portfolio Management) учитывает совокупность проектов, сгруппированных таким образом, чтобы обеспечить выбор оптимального варианта сочетания с учетом последовательности их выполнения и максимизации окупаемости инвестиций.

Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 21504-2016 «Управление проектами, программами и портфелем проектов. Руководство по управлению портфелем проектов» под понятием «портфель проектов» подразумевает набор компонентов, объединенных с целью продуктивного управления и достижения стратегических целей предприятия [2]. Требования к управлению портфелем проектов представлены в источнике [3].

Николина Ю. в статье «Управление портфелем проектов» рассматривает портфель проектов в качестве определенного набора задач, над которыми компания работает для того, чтобы добиться одной из стратегических целей бизнеса [7].

При формировании портфеля проекты отбираются по различным признакам, лежащим в основе выбора. Евсеева М.В. выделяет следующие характерные черты, по которым проекты группируются в портфель: целевая ориентация, степень соответствия стратегии, метод увеличения активов, тип формирующего объединения, вид корреляции проектов, форма функционирования предприятия, стадия развития предприятия, назначение проектов, новаторский характер портфеля, влияние проекта на бизнес структуру предприятия, уровень процессов [8, с.166-167].

Управление портфелем проектов используется организациями для определения потенциальной отдачи от проекта. PPM дает возможность компаниям, которые хотят инвестировать в новые конкурирующие проекты, прогнозировать риски, присущие каждому проекту, и принимать обоснованные решения. PPM облегчает командное общение и гарантирует, что все стороны, участвующие в проектах, будут максимально эффективно взаимодействовать друг с другом.

Основной целью управления портфелем проектов является максимизация выгод, которые предприятие получает от реализуемых проектов.

Оптимальное сочетание проектов гарантирует, что организация будет находиться в наиболее выгодном положении для достижения операционных и финансовых целей.

Главной целью управления портфелем проектов служит расстановка приоритетов по проектам, планирование, укомплектование их квалифицированным персоналом, контроль и информирование всех вовлеченных сторон об их статусе.

Механизм управления проектами на предприятии представляет собой совокупность средств и методов воздействия на деятельность участников проекта на всех этапах его реализации. Он формируется на основе целевого подхода и взаимосвязи с методами и принципами управления проектами.

Алгоритм управления проектами подразумевает наличие организационных процедур принятия управленческих решений, основывающихся на разработке и анализе математических моделей организационного управления проектами: ролевую модель, ключевые контрольные точки, документы управления проектом, документы по продукту проекта, рабочие документы и совещания.

Непосредственное управление портфелем проектов осуществляется портфельными менеджерами или офисом управления проектами. Ключевым направлением является обеспечение того, чтобы все результаты в портфеле поддерживали стратегические цели организации. Для этого портфельный менеджер проводит бизнес-анализ, анализ и прогнозирование бюджетов, минимизируя риски и управляя ожиданиями заинтересованных сторон [9, с.109-111]. Функционал портфельного менеджера подразумевает также формирование определенных стандартов в рамках конкретной компании.

Процесс управления портфелем включает пять этапов [9]:

1. Уточнение бизнес-целей: четкая формулировка стратегических целей организации.

2. Сбор и исследование запросов и идей по проектам: согласование стратегических целей и критериев оценки проектов.

3. Выбор наиболее эффективных проектов с применением дифференциаторов, которые позволяют максимизировать стоимость портфеля и сбалансировать его с учетом рисков.

4. Проверка осуществимости портфеля (межпроектные зависимости, квалификация и профессионализм исполнителей, спрос на ресурсы и их доступность, бюджетные ограничения) и дальнейшее инициирование проектов.

5. Управление и мониторинг портфеля: портфельный менеджер взаимодействует с руководителями проектов или проектным офисом с целью:

- сбора информации для мониторинга эффективности портфеля;
- выявления и решения проблем в рамках портфеля, включая перераспределение ресурсов;
- управления портфелем с оперативным внесением изменений;
- инициации полного обзора портфеля и его реконструкции.

Процесс управления портфелем проектов определяет наиболее важные различия между проектами, такие как возврат инвестиций, риски, эффективность или стратегический баланс [10, с.122-123]. Затем данные дифференциаторы используются для выбора высокоэффективных проектов и установления приоритетов.

Таким образом, механизм управления проектами предприятия определяется в зависимости от организационной структуры, масштабов деятельности предприятия, стратегии его развития, содержания проектов.

2. Место и роль управления портфелем проектов в судостроительной отрасли

Существующий сегодня научный и производственный потенциал отечественных судостроительных предприятий обеспечивает строительство гражданских и военных судов любой категории и уровня сложности.

Однако существует ряд факторов, препятствующих улучшению производственных и финансовых показателей отечественных судостроительных предприятий [11]:

- отсутствие эффективной модели управления отраслью и модели управления отдельными компаниями, внутренние конфликты;
- недостаток инвестиций и длительная стагнация производства, отсутствие значительных импульсов для инноваций;
- высокий уровень физического и морального износа основных средств;
- устаревшие технологические и инженерные решения;
- нехватка квалифицированных инженерных и управленческих кадров;
- применение административного ресурса с целью получения заказов вместо конкурентной борьбы за них;
- акцент на производстве продукции военного назначения и низкая конкурентоспособность в области гражданского судостроения;
- низкое качество отечественных комплектующих и изделий, нестабильность их поставок;
- несоблюдение сроков реализации проектов по строительству современных крупных верфей.

Меры, принимаемые российским правительством для решения проблем судостроительной отрасли, оказывают противоречивое влияние на ее развитие. Формирование АО «Объединенная судостроительная корпорация» (АО «ОСК») остановило кризис отрасли и инициировало ряд инвестиционных проектов по основанию модернизированных судостроительных предприятий. Однако возникновение госкорпорации спровоцировало монополию в основных сегментах судостроительного рынка.

Увеличение финансирования государственного оборонного заказа, как в сфере военного судостроения, так и в строительстве специальных и вспомогательных судов, создало бы достаточно благоприятные условия для развития судостроительной отрасли. Прежде всего, это позволит обновить корабельный состав ВМФ России, а также строительство судов и морских сооружений для разработки и обслуживания морских месторождений углеводородов. Однако из-за системных проблем, накопившихся в судостроительной отрасли за последние 20-25 лет, эффективность использования бюджетных средств остается низкой и вызывает недовольство государственного заказчика, особенно в условиях неблагоприятных экономических условий.

С другой стороны, судостроительные верфи, которые участвуют в одновременном выполнении ряда масштабных проектов, таких как строительство корабля или серии кораблей, сталкиваются с невероятно сложными проблемами планирования. Исторически сложилось так, что традиционные подходы к планированию, используемые

руководством, как правило, приводили к задержкам в завершении или перерасходу средств.

Верфи строят и ремонтируют суда, часто с высоким техническим содержанием, в сотрудничестве с субподрядчиками и поставщиками. Предварительное оснащение, одновременное проектирование и интеграция проектирования, закупок и производства являются важными аспектами планирования на верфи. Каждая верфь работает на нескольких судах одновременно и располагает ограниченным количеством доступных ресурсов. Заказчики требуют высокого качества, соблюдения сроков и высокой надежности исполнения заказа.

Чтобы удовлетворить этим требованиям, руководители всех уровней должны быть сосредоточены на каждом проекте, времени его исполнения и высокой эффективности производства. Планирование времени и мощностей является основополагающим инструментом для достижения этих целей. Однако возможности, которые оно предлагает, не используются на практике в полной мере.

Планирование тесно связано с организационными аспектами. Для того чтобы использовать возможности планирования, данному процессу планирования должна соответствовать организационная структура.

Основные бизнес-процессы на верфи происходят на трех уровнях. На высшем уровне происходит прием заказов и управление портфелем проектов. На среднем уровне мероприятия планируются и распределяются по ресурсам. На низшем уровне задачи поручаются конкретным исполнителям. Структура планирования и организация планирования должны быть разработаны таким образом, чтобы облегчить управление этими процессами [11, с.128].

Современная верфь представляет собой мультипроектную среду, в которой проекты требуют одного и того же набора ресурсов и на начальном этапе обладают неопределенностью. Наличие сбалансированной рабочей нагрузки в организации и пространственных ресурсов, таких как док, имеет решающее значение при планировании. Когда общий спрос на ресурс превышает доступные возможности между проектами могут возникать конфликты. Между видами деятельности различных проектов могут существовать ограничительные отношения приоритета [11]. Поэтому роль управления портфелем проектов судостроительного предприятия нельзя недооценивать.

Концептуальная структура системы проектного управления современной верфи отражена рис. 1, согласно которой управление проектами осуществляется на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях.

Успешные судостроительные предприятия признают, что постоянное совершенствование существующих операций влияет на получение и поддержание конкурентных преимуществ. Они применяют эффективные методы управления портфелями проектов для увеличения своей операционной эффективности.

Согласование проектов со стратегическими целями имеет наибольший потенциал для повышения ценности судостроительного

предприятия [13, с.13-14]. Это требует от заинтересованных сторон разработки последовательных действий, выявления, постановки приоритетов, определения показателей и результатов, а также их целенаправленного достижения. В этом случае программа или проект могут рассматриваться как линия организованной деятельности, которая предназначена для продвижения продукта, удовлетворения потребностей правительства или рынка и будет способствовать получению определенных преимуществ и устойчивости предприятия [13].

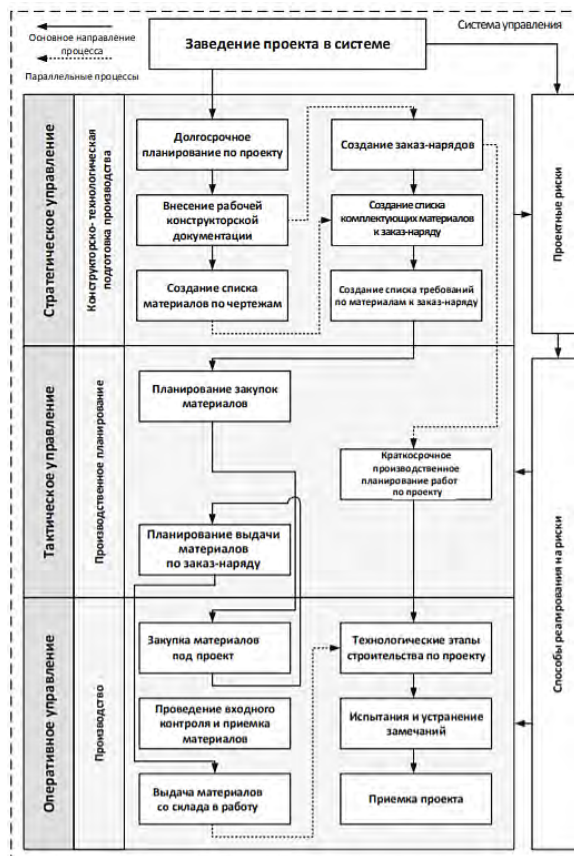


Рис. 1. Концептуальная структура системы управления проектами на судостроительном предприятии

Управление портфелем, содержащим несколько проектов, предполагает понимание миссии организации и принятие решений, которые позволят реализовать выгоды, имеющие стратегическое значение [14]. Поскольку реализация проектов требует затрат ограниченных организационных ресурсов, то определение высокоэффективных проектов, соответствующих в наибольшей степени стратегическим приоритетам судостроительного предприятия, является основополагающим для успеха отечественных верфей.

Менеджеры по управлению портфелем проектов в обязательном порядке должны определять различия в объеме поддержки различных проектов, чтобы максимизировать полезность их сочетания для достижения верфью её стратегических целей. Процесс определения приоритетов включает оценку относительных рисков, выгод и затрат между проектами [17, с.147]. Максимизация соотношения

выгод и затрат при минимизации рисков является общими задачами, выполняемыми на этапах планирования и контроля управления портфелем проектов.

Менеджеры портфеля проектов стремятся выбрать или поддержать проекты, которые уравнивают выгоды и риски. Эффективные границы портфеля проектов могут определять привлекаемые инвестиции в набор проектов, где невозможно получить менее рискованные комбинации проектов относительно желаемого уровня выгоды. Баланс между рисками и доходностью требуется для каждой комбинации проектов, составляющих границу портфеля. В промышленном секторе, таком как военное судостроение, мониторинг рисков является важным мероприятием, так как задержки, наличие рабочей силы, большие затраты могут повлиять на готовность и поддержание флота страны [16]. Чтобы справиться с повторяющимися конфликтными ситуациями с несколькими проектами на верфи, широко применяется управление портфелем проектов, объединяющее проект с функциональной организацией производства [16, с.209].

Обеспечивать достижение данной цели призваны современные программные продукты по управлению портфелем проектов и проектами, которые на сегодняшний день включают новейшие операционные разработки для анализа вероятных рисков, ограничений, ресурсного потенциала и планируемого бюджета проекта. Единственное несовершенство подобных проектных систем кроется в их разобщенности с основными методами их внедрения. Поэтому современные верфи сталкиваются с такими проблемами при внедрении, как ограниченное использование информационной системы в рамках предприятия (например, только для отчетности, финансового планирования или бухгалтерского учета), недостаточная интеграция с отечественными проектными системами, колоссальные финансовые, трудовые и временные инвестиции, необходимость модернизации производства и обновления бизнес-процессов, отсутствие сиюминутного экономического эффекта от внедрения.

Грамотно внедренный и адаптированный под нужды верфи программный продукт обеспечивает следующие преимущества для руководителей всех уровней и исполнителей:

- формирование структуры проекта, характеристика работ и их состава, распределение ресурсов, доходов и расходов по проектам;
- выявление оптимального состава ресурсов и своевременное распределение их плановой нагрузки;
- составление бюджета;
- определение последовательности выполнения работ с учетом временных резервов и критических операций;
- анализ вероятных рисков проектов;
- наблюдение за ходом выполнения проекта;
- наличие своевременных отчетов по проектам.

Кроме того, выделяются различные требования к программному продукту в зависимости от уровня управления. Функционал системы для высшего менеджмента включает такие характеристики эффективное планирование «сверху вниз» и

оперативная отчетность по проектам. Руководители цехов и участков сконцентрированы на стоимостном и ресурсном планировании, инструментах по анализу рисков и контролю реализации проекта. Низший уровень управления, участники команды проекта и исполнители на местах нуждаются в наглядности, в простоте использования системы.

3. Анализ существующей системы управления проектами на судостроительном предприятии

Полигоном применения методики по автоматизированному управлению проектами стало одно из крупнейших судостроительных предприятий России, входящих в состав Объединенной судостроительной корпорации, АО «ПО «Севмаш»».

Это предприятие является судостроительным заводом полного профиля, которое ориентируется на постройку АПЛ, ремонт и модернизацию надводных кораблей, постройку нефтедобывающих платформ. Производство относится к по заказному типу с длительным производственным циклом. Следует подчеркнуть, что постройка изделия осуществляется одновременно с его проектированием [1].

Характеризуя производство, отметим, что оно многопрофильное, так как включает в себя верфь, машиностроение, металлургию, производство судовой мебели, гальваническое производство, производство инструмента и оснастки, электродное производство, вспомогательное производство. Количество подразделений около 100 (в том числе 40 производственных цехов), численность персонала около 28 тыс. человек.

Предприятие обеспечивает реализацию государственного оборонного заказа, процессы отбора и утверждения проектов происходят вне зависимости от руководства предприятия, поскольку проекты назначаются «сверху». Завод осуществляет производственные процессы по выполнению строительства атомных подводных лодок (АПЛ). Государственный оборонный заказ составляет в среднем 95% портфеля заказов предприятия.

В настоящее время информационная система судостроительного завода базируется на 5 элементах ИТ-инфраструктуры: центр обработки данных, внешний контур, внутренний контур, общесистемное программное обеспечение, автоматизированные рабочие места.

На судостроительном заводе в рамках «внутреннего контура» информационной системы предприятия используется определенный набор функциональных подсистем, где особое внимание уделяется сетевому планированию/управлению проектами [1]. Эта подсистема взаимодействует с конструкторской подготовкой производства, технологической подготовкой производства, управлением ресурсами, оперативно-производственным планированием, технико-экономическим планированием. На предприятии планируется, что драйверами роста во внутреннем контуре станут следующие подсистемы «оперативно-производственное планирование», «сетевое планирование/управление проектами». Это объясняется массовым переводом в «цифру» графиков производства.

Функциональная подсистема «сетевое планирование/управление проектами» включает в себя несколько сложных комплексов задач, среди

которых следует указать: построение генерального сетевого графика создания судна и технологического графика постройки судна.

Генеральный сетевой график – сетевая модель, отображающая последовательность наступления событий процесса создания судна на стадиях проектирования, подготовки производства, постройки и испытаний, а также изготовления и поставки основного контрагентского оборудования. Назначение документа – организация системы контроля заказчика за созданием судна.

Технологический график постройки судна – совокупность организационно-технологических документов, основными из которых являются, сетевая модель постройки судна, таблицы распределения трудоемкости постройки, график технической готовности судна, графики комплектации судна изделиями внешней поставки и собственными изделиями МСЧ.

Назначение документа – организация и управление постройкой судна (проекта) на судостроительном предприятии.

Рассмотрим систему управления портфелем проектов АО «ПО «Севмаш». На рис. 2 отображена система управления портфелем проектов предприятия на стадии стапельного периода выполнения заказа на примере малого проекта стыковки реакторного отсека от начала разработки до момента реализации. Как видно, управление проектами осуществляется на трех уровнях: стратегическом, тактическом и оперативном.



Рис. 2. Система управления портфелем проектов предприятия на стадии стапельного периода выполнения заказа

Общий портфель проектов (заказов на стапеле) управляется на стратегическом уровне генерального директора.

Проект головного корабля в серии, включающий примерный план-график свершения ключевых событий при его реализации, относится к

тактическому уровню управления и осуществляется ответственным сдатчиком и заместителями начальников соответствующих цехов.

Проект строительства головного корабля в серии разделяется на малые проекты (закладка, гидравлические испытания прочного корпуса, погрузка КГО и стыковка отсеков, сдача под электромонтажные работы, вывод из эллинга). Выполнение перечисленных работ осуществляется с учетом ключевого события. В нашем случае, ключевым событием будет выступать проект стыковки реакторного отсека.

Для свершения ключевого события строителю кораблей необходимо реализовать два проекта: строительство паропроизводящей установки ядерного реактора и выполнение объема работ в самом отсеке, обеспечивающих его готовность к стыковке. Он назначается руководителем малых проектов.

В команду проекта включены специалисты от подразделений (старшие мастера участков, конструкторы ПКБ, технологи НТУ и технических отделов цехов исполнителей, представители проектных организаций и др.). Команда проекта под руководством менеджера проекта стремится выполнить тактическую цель (стыковка отсека) и в своей работе решает оперативные задачи (оперативный уровень управления).

Строитель кораблей, выступая представителем дирекции в своей деятельности (планирование, организация и контроль за продвижением работ) с целью достижения тактических целей, ставит производству оперативные задачи (например, монтаж оборудования или прокладка трубопровода по чертежам).

Оперативные задачи могут либо оказывать влияние на сроки свершения тактических целей (критические задачи), либо не оказывать, и тогда они имеют запас по времени, однако если их выполнение отсрочить, то они могут перейти в разряд критических задач. Ввиду того, что строитель кораблей не является линейным руководителем членов команды проекта, непосредственного административного воздействия (поощрение, наказание) он не оказывает. Поэтому на этом уровне может происходить задержка сроков выполнения задач со стороны исполнителей. Процесс управления проектом отражен на рис. 3.

Единая автоматизированная система управления проектами на предприятии не предусмотрена, что выступает основной проблемой, снижающей оперативность и эффективность управления проектами.

В настоящее время строительство кораблей организовано на основе *графиков работ* и внедрение системы управления портфелем проектов жизненно необходимо на предприятии, так как автоматизация процессов управления проектом обеспечит оперативность и скорость принятия управленческих решений на всех уровнях, позволит усилить контроль за их выполнением.

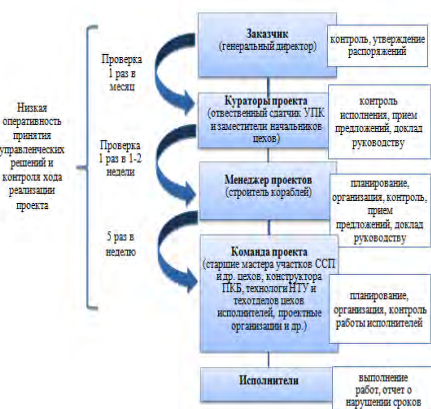


Рис. 3. Процесс управления малым проектом
«Стыковка реакторного отсека»

4. Совершенствование системы управления портфелем проектов с применением современных информационных технологий

На сегодняшний день внедрению систем проектного управления на российских верфях способствует:

- сильная конкуренция на рынке судостроения и требования к высокому качеству производимой продукции;
- необходимость взаимодействия со смежными предприятиями;
- неминусовость трансформации оргструктуры и модернизации производства;
- целесообразность сокращения сроков реализации проектов;
- работа в условиях цифровизации и обработки больших объемов данных.

Применение систем проектного управления на судостроительном предприятии способствует:

- отслеживанию проектов на соответствие стратегии развития;
- повышению качества производственного процесса и производимой продукции;
- увеличению эффективности распределения ресурсов;
- упрощению управления ходом реализации проекта и прогнозирования вероятных рисков;
- повышению продуктивности коммуникации между всеми участниками;
- наличию оперативной отчетности, позволяющей экономить время руководителей всех уровней.

Внедрение современных проектных технологий в управление и производство отечественных судостроительных предприятий встречает ряд трудностей. Одной из них служит необходимость их полного переоборудования с учетом применения программного обеспечения. В виду трудоемкости отрасли, большим количеством работ не все предприятия могут участвовать в конкуренции за госзаказы. Полное переоборудование производства требует значительных финансовых вложений в капитальное строительство и оснащение построечных мест.

Вторая проблема заключается в том, что программные продукты в области управления проектами с учетом специфики отрасли являются

дорогостоящими, и не каждое предприятие может их приобрести.

Еще одной проблемой выступает дефицит финансирования судостроительных предприятий. Как известно, строительство судов обуславливает развитие таких отраслей национальной экономики, как металлургия, машиностроение, электроника и ряд смежных отраслей. Однако, привлечение инвестиций в судостроительную отрасль сталкивается с определенными трудностями. Это сложное производство, предполагающее высокую трудоемкость, наукоемкость и капиталоемкость. Бизнес-процессы становятся зависимы от долгосрочного цикла постройки судна.

Процесс внедрения программного обеспечения усложняется недостаточной квалификацией персонала, высокой трудоемкостью обучения, отсутствием должной мотивации, неготовностью руководителей к переменам, отсутствием системы делегирования должностных полномочий, что, в итоге, приводит к возникновению различных рисков внедрения, связанных с человеческим фактором.

Определенную сложность использования современных технологий проектирования в деятельности судостроительных компаний вызывает неизбежность учета национальных и международных стандартов.

Специалисты предлагают рекомендации для руководителей при решении вопроса о внедрении системы управления проектами:

1. Цели реализации проекта должны быть определены стандартом предприятия.
2. Четкая система показателей для внедрения на предприятии.
3. Важность организации обучения сотрудников в рамках планируемой проектной системы.
4. Оценка целесообразности внедрения системы управления проектами экспертным методом (сравнение затрат и возможного эффекта).

Важным инструментом управления проектом является программный продукт, способствующий выполнению качественного планирования и производит необходимые расчеты. На сегодняшний день в применяют программные продукты: Microsoft Project, Spider Project, ЛОЦМАН:КБ, Global-MFS, 1С-Парус, Advanta (табл. 2).

Таблица 2

Преимущества и недостатки систем управления проектами

Название	Описание	«+»	«-»
Microsoft Project	календарное планирование, контроль проектов; ресурсное и бюджетное планирование; проектный документооборот; отчетность по проектам, портфелю проектов	простота освоения; возможность сохранения данных проектов в Access; обмен данными Outlook; планирование небольших проектов; для предприятий с матричной структурой управления	для пользователей, не являющихся профессионалами в области управления проектами; ограниченные средства управления бюджетом; отсутствие средств для управления рисками проекта

Spider Project	множественные иерархические структуры; ввод и применение неограниченного количества компонентов	широкие возможности применения; нормативно-справочная информация; поддержка стандартных форм отчетности	для профессионалов в области управления проектами
«ПОЦМАН: КБ»	типовое решение для создания и управления электронным архивом конструкторской документации	возможность работы через Интернет и с различными CAD-системами; доступная цена; адаптивная базовая конфигурация; минимальные затраты на внедрение	узкая сфера применения
Global «Судостроительное (Global-MFS)»	Широкий функционал системы	специализация «судостроение»; быстрый анализ ситуации; не требует доработки; доступ с любого рабочего места; графический редактор бизнес-процессов; веб-доступ и мобильные приложения, система оповещений	высокая стоимость
1С-Парус: Управление проектами	представляет собой дополнение к конфигурации 1С: Бухгалтерия; планирование, организация, координация и контроль проектных работ, ресурсов	многоуровневое представление проекта	ориентация на предприятия, использующие программы «1С»; отсутствие функционала для оценки возникновения рисков и хода выполнения работ

Стоит отдельно выделить программный продукт Advanta, который представляет собой управленческую систему для планирования, развития и контроля бизнеса за счет средств визуализации посредством целостного отображения проектов и бизнес-процессов. Система управления проектами Advanta обеспечивает организацию работы всех участников по разработке и построению судна, включая внешних контрагентов, в том числе в удаленном формате с использованием сети Интернет. Достоинства и недостатки системы представлены на рис. 4.

Базой функционирования данной системы является новая технология проектного управления – «технология достижения цели», которая заключается в современном представлении процесса управления проектами в форме поэтапной детализации бизнес-процессов, начиная от общего видения проекта и заканчивая конкретной задачей и исполнителем. Основным элементом системы является

стратегическая карта, которая позволяет визуально выстраивать структуры проектов и портфелей [17].

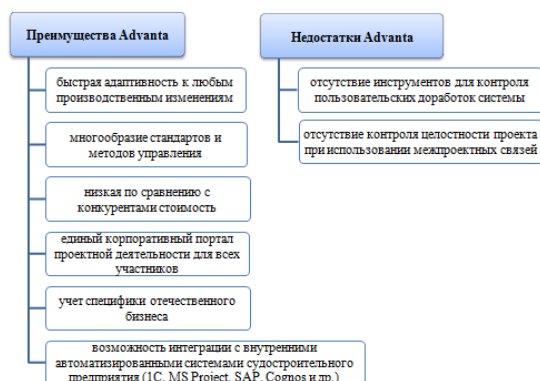


Рис. 4 Преимущества и недостатки системы Advanta

В основе любого решения системы Advanta находится корпоративное дерево проектов. В нем по всем направлениям деятельности можно структурировать проекты предприятия. При этом каждый проект имеет собственный паспорт и профиль управления, включающий куратора проекта, руководителя проекта, ключевые параметры (лимит финансирования, заключенные контракты, жизненный цикл проекта, отчетность, плановые и фактические показатели использования трудовых и временных ресурсов, поставок и пр.).

Настройки параметров жизненного цикла проекта включают в себя этапы производства и организуют работу исполнителей проекта по необходимому сценарию.

Классический инструмент управления проектом – это диаграмма Ганта, с помощью которой можно видеть единый график выполнения проекта в календарном исполнении по каждому участнику на конкретном этапе реализации, редактировать сроки решения задач, менять исполнителя, управлять загрузкой ресурсов, определять трудоемкость задач, видеть нагрузку на каждый ресурс предприятия.

Программа содержит определенные разделы, способствующие эффективной организации работы проектной команды. Проектная система Advanta включает отчетность для высшего руководства судостроительного предприятия. Уникальная панель руководителя позволит получить понятные и актуальные отчеты в разнообразных представлениях. Даштборды для руководителя разрабатываются под заказ.

Единый реестр текущих проектов дает возможность высшему руководству предприятия увидеть состояние каждого проекта в определенных контрольных точках и возникающие отклонения в его реализации. Управление портфелем проектов топ-менеджер может производить с помощью одного отчета с основными показателями и контрольными точками.

Программным комплексом Advanta можно обеспечить высшее, функциональное руководство и инженерно-технических работников предприятия в производственных цехах (начальник цеха, его заместители, начальники участков, старшие мастера и мастера, начальник планово-диспетчерского бюро и его подчиненные инженеры по подготовке

производства, начальник технологического отдела цеха и его подчиненные цеховые технологи и др.).

Для начала внедрение системы рационально будет проводить на уровне высшего руководства, функциональных руководителей и подразделений основного производства (стапельные цеха), которые выполняют работы по непосредственному созданию конечного продукта. На стапеле необходим постоянный контроль за продвижением работ по проекту. С системой Advanta все задачи и сроки фиксируются и могут быть проконтролированы в режиме онлайн любой заинтересованной стороной без фактического присутствия непосредственно на месте осуществления работ.

Цеха машиностроения на предприятии рекомендуется включать в программу внедрения Advanta после подтверждения ее пользы и эффективности на стапеле.

Таким образом, производственный процесс осуществляется следующим образом: ПКБ разрабатывает конструкторскую документацию под изготавливаемую продукцию. НТУ реализует нормативно-технологическое обеспечение строительства АПЛ. УПК планирует весь процесс строительства субмарины, разрабатывая графики завершения работ, а также контролирует сроки свершения ключевых событий строительства по данным этих графиков. Соответственно указанные цеха и ССП занимаются непосредственным выполнением запланированных работ.

Позицию менеджера проектов на предприятии представляет строитель кораблей. Его обязанности заключаются в планировании, организации и контроле выполнения работ в установленные сроки.

Процесс управления проектом изменится и будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

Строитель кораблей в любое время может в электронной форме подготовить предложение с поручением по своему проекту, согласовать его у ответственного сдатчика.

Ответственный сдатчик при условии влияния данной оперативной задачи на общий срок свершения тактической цели, сможет обратиться с данным предложением на уровень контроля 1-го заместителя генерального директора. Утверждение предложения 1-ым заместителем генерального директора делает ее обязательной к исполнению.

Электронная фиксация поставленных исполнителям задач, позволит применять к ним административные воздействия, что будет способствовать повышению сроковой дисциплины. Повышение сроковой дисциплины и ответственности исполнителей за счет фиксации результатов, сроков и выполненных мероприятий по продвижению готовности каждого проекта обеспечит объективную оценку их творческого и инициативного подхода к порученному делу с возможностью поощрения.

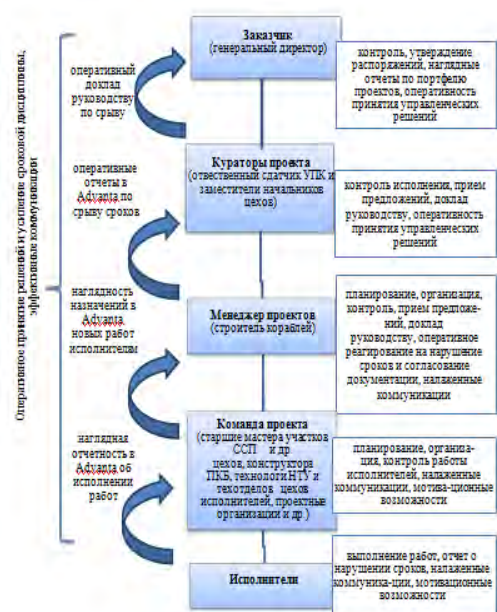


Рис. 5. Процесс управления малым проектом «Стыковка реакторного отсека» после внедрения системы Advanta

Бюджет внедрения системы Advanta составит 50,55 млн. руб., включая 44,6 млн.руб. на покупку лицензии и затрат на настройку, внедрение системы и обучение персонала – 6 млн. руб. С момента покупки первой лицензии предприятие получает доступ к гарантийной и сервисной поддержке, а также к обновлениям системы сроком на 1 год.

В результате экономия расходов на оплату труда в год составит 1521,0 тыс.руб., а за весь период реализации проекта внедрения системы Advanta – 4563,0 тыс. руб.

Методом экспертной оценки спрогнозировано увеличение выручки судостроительного предприятия в результате повышения результативности производственного процесса в целом. В группу экспертов вошли следующие участники:

- первый заместитель генерального директора;
- главный инженер;
- сотрудники отдела автоматизированных систем управления предприятия;
- сотрудники финансового отдела;
- начальник УПК;
- начальник ССП;
- строители кораблей.

Эксперты проанализировали функционал системы, отзывы от руководителей других предприятий тяжелой промышленности, которые уже внедрили ее в производство, и оценили прогнозное значение повышения выручки в 20% ежегодно. Высокий показатель достигается за счет масштабного и комплексного оборудования системой Advanta производственного процесса.

С учетом ставки дисконтирования 10% (определенной исходя из рентабельности собственного капитала и премии за риск), дисконтированный срок окупаемости проекта составит 2,06 г. (табл. 3).

Таблица 3
Показатели эффективности внедрения системы Advanta

Показатель	Значение	Критическое значение
Чистый дисконтированный доход (NPV), млн. руб.	22,7	> 0
Индекс рентабельности проекта (PI)	1,45	> 1
Внутренняя норма доходности проекта (IRR), %	44,9	> 0
Срок окупаемости инвестиций (PP), г.	2,06	> 0

Расчетные данные доказывают, что проект является экономически эффективным.

Потенциальная польза от внедрения системы управления проектами Advanta на рассматриваемом судостроительном предприятии – это переход на качественно новый уровень управления портфелем проектов, отдельными проектами и производством в целом. Основной эффект – совершенствование работы сотрудников всех уровней, улучшение их коммуникаций в проекте, облегчение процессов согласования документации, повышение прозрачности деятельности по проекту, усиление сроков дисциплины и мотивационные возможности для развития творческого и инициативного потенциала сотрудников.

Заключение

Данное исследование вносит вклад в развитие теории и практики управления проектами на судостроительном предприятии.

В статье представлены теоретические основы исследования в области управления проектами.

Авторы работы провели анализ терминов «проект», «портфель проектов», «управление портфелем проектов» и подтвердили многообразие трактовок и неоднозначность суждений о данной категории в научном сообществе и в практической деятельности. Это позволило обосновать актуальность исследования, показать место и роль управления проектами в судостроительной отрасли.

В статье представлен анализ системы управления проектами на судостроительном заводе, входящем в состав ОСК. Следует отметить, что информационная система судостроительного завода базируется на нескольких элементах ИТ-инфраструктуры: центр обработки данных, внешний контур, внутренний контур, общесистемное программное обеспечение, автоматизированные рабочие места. В рамках «внутреннего контура» информационной системы особое внимание уделяется сетевому планированию/управлению проектами.

Проведенный обзор современных систем управления проектами, показал, что совершенствование механизма управления проектами возможно за счет внедрения системы Advanta, включая необходимые организационные преобразования.

Оценка целесообразности внедрения произведена квалифицированными экспертами соответствующего уровня управления. Выполненные расчеты наглядно представлены в табличной форме и обоснованы методом дисконтирования.

Направлениями дальнейшего исследования может стать учет специфических особенностей деятельности конкретного судостроительного предприятия при выборе программного продукта и предъявляемых к нему требований.

Литература

- Будниченко, М. А. Формирование ИТ-инфраструктуры судостроительного предприятия в ходе модернизации // Морские интеллектуальные технологии, 2018, № 4-4(42), С. 175-185.
- ГОСТ Р ИСО 21504-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Управление проектами, программами и портфелем проектов. Руководство по управлению портфелем проектов. - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200140442/>
- ГОСТ Р 54869-2011 Национальный стандарт Российской Федерации. Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 01.09.2011 № 1582-ст)
- ГОСТ Р 54870-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2011 № 1583-ст).
- Ибрагимов, И. Р. Построение иерархической структуры при планировании работ верфи // Вестник Астраханского государственного технического университета, 2004, № 1(20), С. 147-151.
- Мазур И.И. Управление проектами. М.: Омега-Л, 2018, 664 с.
- Николина Ю. Управление портфелями проектов // Управление предприятием: электрон. журн. 2021, №5.
- Евсеева М.В. Управление портфелем проектов и программ: современные требования // Известия Саратовского университета, 2019, Т. 19, № 2, С.165-171.
- Грачева М.В. Управление проектами. М.: МГУ, 2017, 148 с.
- Ручкин А.В. Управление проектами: Основные определения и подходы // Вопросы управления, 2017, № 3 (46), С. 121-128.
- Шпаченков Ю.А. Управление проектами как инструмент промышленного развития судостроительных предприятий // Вестник Астраханского государственного технического университета, 2013, №2, С.127-312.
- Dijk van R. Multi-project planning in shipbuilding [Electronic resource] / Roelof van Dijk, Noud Gademann, Geert Schouten, Marco Schutten // Eindhoven University of Technology, 2002.

13. Зайченко И.М. Анализ инновационных стратегий в условиях цифровой трансформации // Научный вестник Южного института менеджмента, 2019, №2, С.12-18.
14. Glickman T.S. Program portfolio selection for reducing prioritized security risks // European Journal of Operational Research, 2008, №10, P. 268-276.
15. Diaz R. Shipbuilding Supply Chain Framework and Digital Transformation: A Project Portfolios Risk // Evaluation Procedia Manufacturing. 2020. №1, P. 173-180.
16. Платдже А. Прорыв в управлении несколькими проектами, как вырваться из порочных кругов планирования и контроля // Управление проектами, 2013, №11, С.209-213.
17. О системе [Электронный ресурс] // Адванта: [официальный сайт]. 2021. – Режим доступа: <https://www.advanta-group.ru/about-system/>

References

1. Budnichenko, M. A. Formirovanie IT-infrastruktury sudostroitel'nogo predpriyatiya v hode modernizatsii [Formation of the IT- infrastructure of a shipbuilding enterprise in the course of modernization]. Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018, № 4-4(42), p. 175-185.
2. GOST R ISO 21504-2016. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Upravlenie proektami, programmami i portfelem proektov. Rukovodstvo po upravleniyu portfelem proektov [National standard of the Russian Federation. Project, program and Project Portfolio Management. Project Portfolio]. [Electronic resource]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200140442/>
3. GOST R 54870-2011. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Proektnyj menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu proektom [National standard of the Russian Federation. Project management. Project management requirements] (utv. i vveden v dejstvie Prikazom Rosstandarta ot 01.09.2011 № 1582-st).
4. GOST R 54870-2011. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Proektnyj menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu portfelem proektov [National standard of the Russian Federation. Project management. Project management requirements] (utv. i vveden v dejstvie Prikazom Rosstandarta ot 22.12.2011 № 1583-st).
5. Ibragimov, I. R. Postroenie ierarhicheskoy struktury pri planirovanii rabot verfi [Work planning of the shipyard: ahierarchical structure]. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2004. № 1(20). p. 147-151.
6. Mazur I.I. Upravlenie proektami [Project management]. M.: Omega-L, 2018, 664 s.
7. Nikolina Ju. Upravlenie portfeljami proektov [Project Portfolio Management]. Upravlenie predpriyatiem: jelektron. zhurn. 2021, №5.
8. Evseeva M.V. Upravlenie portfelem proektov i programm: sovremennye trebovaniya [Project and Program Portfolio Management: Modern Requirements]. Izvestiya Saratovskogo universiteta, 2019, T. 19, № 2, S.165-171.
9. Gracheva M.V. Upravlenie proektami [Project management]. M.: MGU, 2017, 148 S.
10. Ruchkin A.V. Upravlenie proektami: Osnovnye opredeleniya i podhody [Project Management: Basic Definitions and Approaches]. Voprosy upravleniya, 2017, № 3 (46), S. 121-128.
11. Shpachenkov Ju.A. Upravlenie proektami kak instrument promyshlennogo razvitiya sudostroitel'nyh predpriyatij [Project management as a tool for the industrial development of shipbuilding enterprises] Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2013, №2, S.127-312.
12. Dijk van R. Multi-project planning in shipbuilding [Electronic resource] / Roelof van Dijk, NoudGademann, Geert Schouten, Marco Schutten // Eindhoven University of Technology, 2002.
13. Zajchenko I.M. Analiz innovacionnyh strategij v uslovijah cifrovoj transformacii [Analysis of innovative strategies in the context of digital transformation]. Nauchnyj vestnik Juzhnogo instituta menedzhmenta, 2019, №2, p.12-18.
14. Glickman T.S. Program portfolio selection for reducing prioritized security risks. European Journal of Operational Research, 2008, №10, P. 268-276.
15. Diaz R. Shipbuilding Supply Chain Framework and Digital Transformation: A Project Portfolios Risk. Evaluation Procedia Manufacturing. 2020. №1, p. 173-180.
16. Platdzhe A. Proryv v upravlenii neskol'kimi proektami, kak vyrvat'sja iz porochnykh krugov planirovaniya i kontrolja [Breakthrough in managing multiple projects, how to break the vicious cycles of planning and control]. Upravlenie proektami, 2013, №11, S.209-213.
17. О системе [Electronic resource]. Advanta: [official site]. 2021. Available at: <https://www.advanta-group.ru/about-system/>

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузнецова Марина Николаевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры истории, экономики и права, ведущий инженер научного отдела, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17, e-mail: m.kuznetsova@narfu.ru

Marina N. Kuznetsova, Ph.D (Econ), Assistant professor, Associate professor of Department of history, economics and law, leading engineer of the scientific department, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: m.kuznetsova@narfu.ru

Васильева Анастасия Сергеевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры истории, экономики и права, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17, e-mail: a.vasileva@narfu.ru

Anastasia S. Vasilyeva, Ph.D (Econ), Assistant professor, Associate professor of Department of history, economics and law, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: a.vasileva@narfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 19.01.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 12.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 01.11.2023.

Научная статья

УДК 656.60.009.02

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.031>

Определение необходимости эвакуации порожних контейнеров из морского терминала

Стрельников Д.Д.¹ strelnikov.denis@mail.ru, Стрельникова И.А.¹ strelnikova.ia@inbox.ru,

Артамонова М.Ю.¹ mashenka2005@yandex.ru, Колбасин С.С.¹ sknvrsk@bk.ru

¹ГМУ им.адм. Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск

Аннотация. В статье рассмотрена проблема репозиционирования контейнеров из порта с избытком контейнерного оборудования в порт с его дефицитом или нормальной утилизацией контейнерного парка. Изучена статистика порта Александрия и порта Амбарли в качестве примера для обоснования необходимости передислокации порожних контейнеров. Отмечено, что необходимость репозиционирования порожнего оборудования стоит во всех морских контейнерных линиях. Предложен метод расчета коэффициента экономической целесообразности передислокации, который показывает соотношение транспортных расходов по передислокации порожних контейнеров к расходам на хранение порожних контейнеров с учетом сроков бесплатного хранения и ставки на сверхнормативное хранение в стоке. Предложена шкала оценки коэффициента экономической целесообразности передислокации, которая может быть адаптирована под конкретную контейнерную линию в зависимости от операционных показателей и параметров хранения в рассматриваемых морских портах.

Ключевые слова: морские контейнерные перевозки, принятие решений, морская контейнерная линия

Для цитирования: Стрельников Д.Д., Стрельникова И.А., Артамонова М.Ю., Колбасин С.И. Определение необходимости эвакуации порожних контейнеров из морского терминала. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 263—270. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.031

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.031>

Determination of the need to evacuate empty containers from the sea terminal

Denis D. Strelnikov¹ strelnikov.denis@mail.ru, Inessa A. Strelnikova¹ strelnikova.ia@inbox.ru,

Maria U. Artamonova¹ mashenka2005@yandex.ru Sergei S. Kolbasin¹ sknvrsk@bk.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk

Abstract. The article considers the problem of reposition of empty containers from a port with an excess of container equipment to a port with its shortage or normal disposal of the container fleet. The statistics of the port of Alexandria and the port of Ambarli were studied as an example to justify the need to relocate empty containers. It is noted that the need for repositioning of empty equipment is in all sea container lines. A method for calculating the coefficient of economic feasibility of relocation is proposed, which shows the ratio of transport costs for the relocation of empty containers to the costs of storing empty containers, taking into account the terms of free storage and the rate for excess storage in the drain. A scale for assessing the coefficient of economic feasibility of relocation is proposed, which can be adapted to a specific container line depending on operational indicators and storage parameters in the seaports under consideration.

Key words: sea container transportation, decision-making, container line.

For citation: Denis D. Strelnikov, Inessa A. Strelnikova, Maria U. Artamonova, Sergey I. Kolbasin Determination of the need to evacuate empty containers from the sea terminal. Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 263—270. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.031

Введение

Баланс грузопотоков является ключевым элементом обеспечения стабильной торговли между двумя участниками внешнеэкономической деятельности. Нарушение этого баланса может произойти из-за наращивания одной из сторон объема импортируемых контейнеров, без равноценного увеличения потока экспортируемых. Подобный дисбаланс может привести к тому, что мощностей контейнерных площадок станет недостаточно для обработки и хранения ввозимой продукции в порту-импортере, и в данном порту возникнет переизбыток порожних контейнеров, а в другом - их дефицит.

Для грузоперевозчиков важно прогнозировать ситуацию по состоянию баланса необходимых контейнеров, предупредить их избыточный дефицит или профицит, при этом оптимально расходуя финансы.

Рассмотрим в качестве примера перевозку порожних контейнеров между Египтом и Турцией как наиболее наглядный пример необходимости репозиционирования контейнеров в рамках Восточного Средиземноморья. Стамбул стал крупным логистическим хабом в акватории Чёрного моря и Восточного Средиземноморья, а Александрия наряду с другими портами является удобным транспортным плечом. Для логистических компаний и морских линий, участвующих в этих перевозках, важно правильно принимать решения о хранении или

транспортировке порожних контейнеров в случае избытка порожнего парка в одном из терминалов.

Задачей данного исследования является создание методической основы для принятия решения по репозиционированию контейнеров из порта с профицитом порожнего оборудования в порт с дефицитом необходимо рассчитать затраты на хранение порожних контейнеров и стоимость транспортировки контейнеров между двумя портами.

1. Сравнительная характеристика контейнерных потоков в Турции и Египте

За последние 10 лет контейнерооборот Турции показывает положительную динамику и имеет тренд на постоянный прирост, как в экспортном, так и в импортном направлениях. На графике, представленном ниже, проиллюстрировано, что всего за 2021 год десять крупнейшими портами Турции было обработано 12 543 101 TEU.

Что касается одного из ключевых партнеров Турции – Египта, это – лидирующая страна в Африке по объему перевозок грузов с использованием морских портов: показатели грузооборота за 2021 год в арабской республике достигли 5 972 324 TEU (19-е место в мире). В регионе Ближнего Востока это уступает только ОАЭ (7-е место в мире, 19,297,684 TEU).

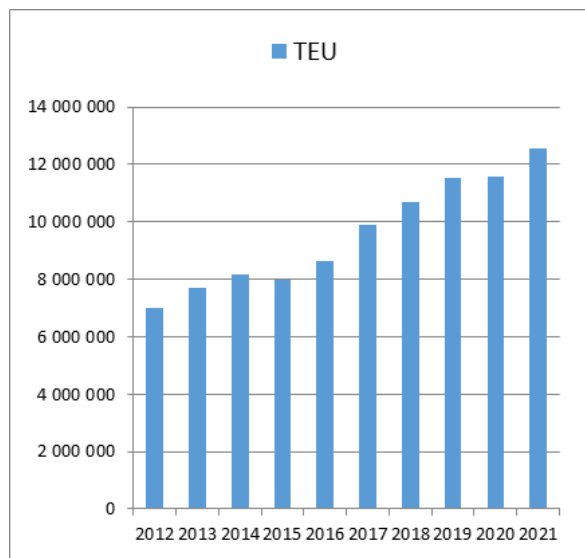


Рис.1 Контейнерооборот Турции

По итогам 2018 года Египет занимал 67 место в мире по показателю Logistics Performance Index — лучшее значение среди африканских стран, хотя на региональном фоне республика уступает Турции и всем арабским монархиям Персидского залива.

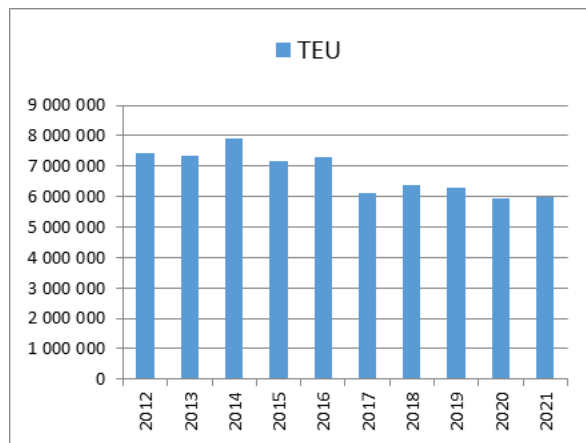


Рис.2 Контейнерооборот Египта

Основная причина такого успеха – наличие в стране важнейшего для мировой торговли Суэцкого канала, который с одной стороны стимулирует логистическую активность, а с другой – является очень привлекательным объектом для участников логистического рынка, в том числе занимающих лидирующее положение в мире. Именно загруженность инфраструктуры Суэцкого канала (особенно Суэцкого контейнерного терминала в Порт-Саиде) обеспечивает большую часть грузооборота, приходящегося на страну. В качестве менее значимого, но тоже весомого фактора следует рассматривать крупные объемы внешней торговли и высокий уровень экономической активности, развитую систему портов (в том числе не связанных с Суэцким каналом), автомобильных и железных дорог, которая здесь одна из лучших в Африке.

Наиболее крупными торговыми партнерами Египта являются США, ОАЭ, Индия, Италия и Турция. В 2021 году объем экспорта в эту страну составил 2,473\$ млрд. В свою очередь, Египет является одним из направлений контейнерной торговли в Африку. Основной поток приходится на порт Александрия.

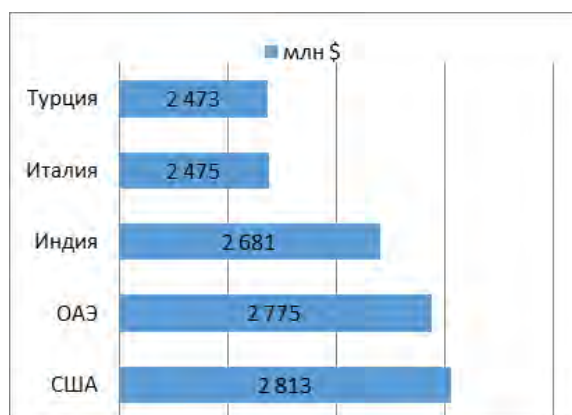


Рис.3 Топ 5 экспортных партнеров Египта в 2021 году (Источник – Egypt: Main export partners in 2021, statista.com)

Грузооборот портов Турции в январе-ноябре 2022 года составил 497,6 млн. тонн, что на 4% больше показателя соответствующего периода прошлого года. Такие данные следуют из отчета главного управления по морским делам при министерстве транспорта и инфраструктуры Турции. Основные направления турецкого экспорта в ноябре сохранились неизменны с 2021 года это – США (1,04 млн. тонн), Италия (1,01 млн. тонн), Египет (929 тыс. тонн). Основные импортеры – Россия (7,49 млн. тонн), США (1 млн. тонн), Египет (936,9 тыс. тонн) и Украина (805 тыс. тонн). При этом по сравнению с октябрем 2022 года из России в Турцию доставлено на 1 млн. тонн грузов меньше.



Рис. 4 Топ 5 экспортных партнёров Турции в 2021г(Источник: Turkey Trade Summary 2021,WITS)

Наиболее крупными торговыми партнёрами Турции являются Германия, США, Англия, Италия и Ирак. В свою очередь, Турция становится крупным логистическим хабом в акватории Чёрного моря, наращивая темпы экспорта контейнерных грузов в Россию, а Амбарли – становится ключевым портом для российского импорта. В качестве примера перемещения порожних контейнеров рассмотрим порт Александрия и порт Амбарли.

Порт Александрия – это важнейший порт на Средиземном море, который играет роль ключевого транспортного узла не только для контейнерных и генеральных грузов, но также является важным портом для специализированного Ро-Ро груза и пассажирских перевозок. Согласно Морской администрации Египта: «Порт Александрия занимает лидирующие позиции среди портов Арабской республики Египет с общим объемом грузоперевалки более 60% от общего числа грузов, переваливаемых в стране.

Согласно отчёту, опубликованному в 2022 году на официальном сайте Генерального управления порта, в 2021 году морской порт Александрия обработал более 64,5 млн. тонн грузов. Наиболее стремительный рост показали контейнерные перевозки, доля которых увеличилась на 17,3% по сравнению с 2020 годом. По словам представителя администрации порта, общее число заходов контейнерных судов в порт увеличилось на 3,7% и достигло 3614 единиц. Вместе с тем, в 2022 году показатели перевалки превысили показания 2021 и составили 13 782 375 тонн в импортном направлении и 11 483 421 тонн – в экспортном.

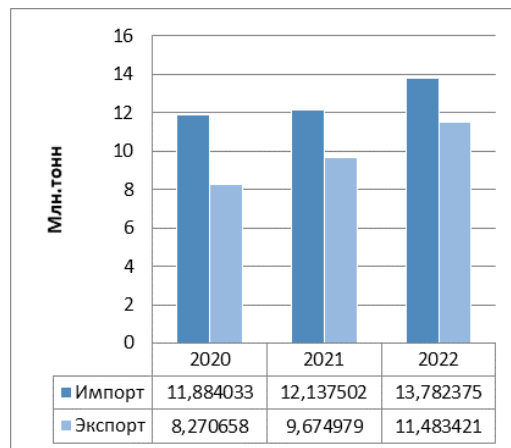


Рис. 5 Динамика перевалки контейнерных грузов

Однако, несмотря на растущие темпы перевалки контейнерного груза, общее число контейнеров, применяемых для их транспортировки – сокращается. Таким образом, можно сделать вывод о возросшем применении технологии сборных грузов (Less-than-Container-Load), а также снижении профицита порожних контейнеров на территории порта Александрия.

Таблица 1
Динамика изменения контейнерооборота в TEU

Год	2020		2021		%	
Тип	Импорт, TEU	Экспорт, TEU	Импорт, TEU	Экспорт, TEU	Импорт	Экспорт
Стандартные	789793	503901	718299	570610	-9	13
Транзитные	899	1096	3860	2859	329	161
Порожние	87214	294114	106088	182063	22	-38
Всего	877906	799111	828247	755532	-6	-5

Тем не менее, профицит порожних контейнеров до сих пор является актуальным; его значимость и величину ярко иллюстрирует график ежегодной прибыли контейнерного терминала порта Александрия. Так, например, предоставление складских услуг и хранения составляют более половины от общей прибыли терминала AlexCont.

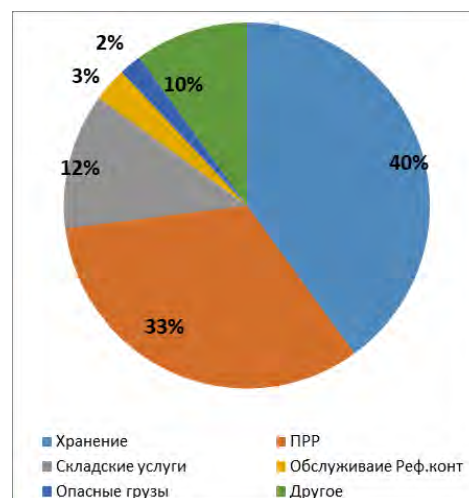


Рис. 6 Основные источники дохода контейнерного терминала порта Александрия

При этом, учитывая внешнеполитические изменения, количество суммарных судозаходов наряду с количеством обработанных контейнеров неуклонно растёт. В определенной степени это объясняется тем, что порты Турции не в силах принять и обработать весь поток грузов, что идет в адрес России. Судовладельцы, которые доставляют грузы в Россию и по всему Азово-Черноморскому бассейну, все чаще отправляются в Египет для перевалки грузов, чем в Турцию из-за того, что очереди в турецких портах неуклонно увеличиваются. Также Александрия становится привлекательным портом перевалки и для тех, кто доставляет грузы из России в Африку.

Порт Амбарли – один из крупнейших портов Турции и лидер по перевалке контейнеров на территории страны, располагается в 34 км от порта Стамбул. В 2021 году порт обработал 2 942 549 TEU. Тип судов, которые обычно обрабатывает порт – контейнерные суда (45% от общего числа судов), суда генерального назначения (22%), Танкеры (3%), Другие (30%). Максимальная допустимая длина судна составляет 399 м, а осадка – 14,5 м. Порт Амбарли на протяжении 10 лет является лидером по контейнерообороту среди крупнейших 10 портов Турции.

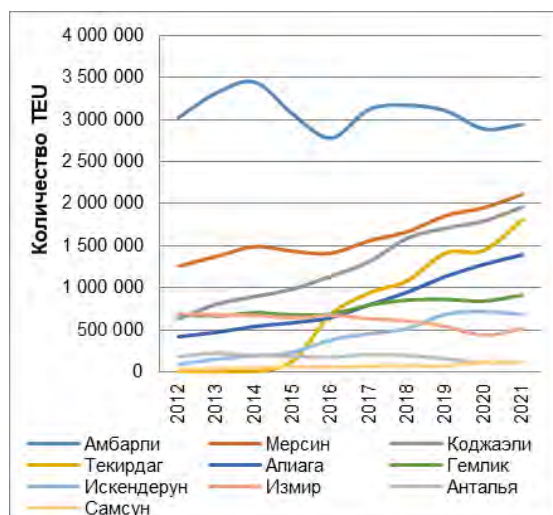


Рис. 7 Контейнерооборот десяти крупнейших портов Турции за 10 лет

В то же время, к 2021 году количество обрабатываемых транзитных контейнеров стремительно увеличилось на 18%, что составляет дополнительные 8311 TEU в месяц. Также благодаря росту количества каботажных контейнерных перевозок, общее число обработанных контейнеров за 2021 год увеличилось почти на 1,7% и составило 2,953 млн. TEU.

Таблица 2

Динамика изменения контейнерооборота в TEU

Год	2020		2021		%	
Тип	Импорт	Экспорт	Импорт	Экспорт	Импорт	Экспорт
Локальные	1153433	1119028	1097295	1 112 969	-5	-0,5
Транзитные	448713		548445		+18,18	
Каботажные	182660		195179		+6,41	
Всего	2903834		2953895		+1,69	

В целом, в обоих портах обработка контейнеров к 2021 году показала рост и достигла суммарно 4 537 674 TEU. Доля Александрии составляет 34,9% от общего числа.

Необходимо отметить, что в порту Амбарли прирост экспорта был в 10 раз выше темпов роста импорта. Таким образом, к 2021 году импорт снизился на 5% относительно предыдущего года, тогда как экспорт – лишь на полпроцента. Это привело к изменению общей тенденции на превалирование импорта над экспортом. Другими словами, в 2021 году в порту Амбарли было экспортировано на 15 674 контейнеров больше, чем было импортировано, что говорит об изменившейся стратегии перевозчиков в работе с данным портом и наращиванию грузопотока из Турции в Россию.

В крупнейшем порту Египта, в свою очередь, на протяжении трёх лет количество ввезённых контейнеров стабильно превышает количество вывезённых. На приведённом ниже графике видно, что к концу 2021 года прирост импорта находился на своих максимальных показателях за последние 3 года и составлял 92 909 TEU.



Рис. 8 Разница между импортными и экспортными контейнерами

Также для оценки интенсивности взаимодействия между двумя странами и, в частности портами Александрия и Амбарли, в контейнерных перевозках существует система оценки Линейного взаимодействия, внедрённая Конференцией ООН по торговле и развитию – Билатеральный, т.е. – двусторонний, индекс взаимодействия. Максимальное значение принимается за 1 (единицу), минимальное – за 0 (ноль). Результаты расчета билатерального индекса представлены на официальном портале UNCTAD в разделе STAT.

При подсчёте индексов учитывается 5 основных пунктов:

- 1) Количество необходимых траншпментов при транспортировке груза из Турции в Египет;
- 2) Количество прямых контейнерных направлений в обе стороны;
- 3) Количество возможных маршрутов в страну с учетом одного траншпмента;
- 4) Уровень конкуренции на линейном рынке между Египтом и Турцией;
- 5) Размер крупнейшего судна на наиболее непопулярном плече, соединяющим Египет и Турцию.

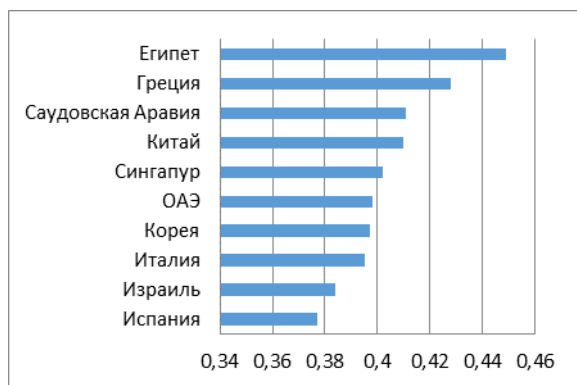


Рис. 9 Билатеральный индекс взаимодействия Турции в 2021 г. (Источник – Maritime profile: Türkiye, портал UNCTAD STAT)

Таким образом, данный индекс показывает, что Египет в 2021 году был самым удобным и отлаженным маршрутом торговли для Турции. Тогда как для Египта, Турция находится в пятерке наиболее предпочтительных маршрутов торговли наряду с Италией, Испанией, Саудовской Аравией, Китаем.

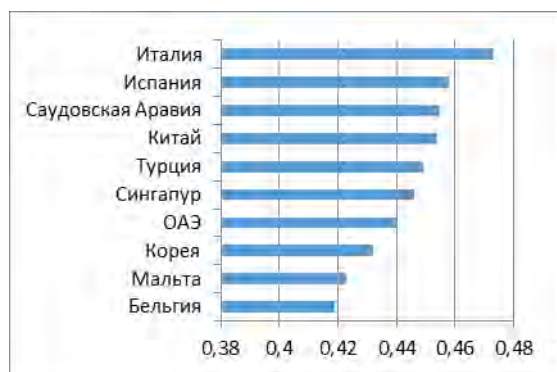


Рис. 10 Билатеральный индекс взаимодействия Египта в 2021 г. (Источник – Maritime profile: Egypt, портал UNCTAD STAT)

2. Метод определения необходимости репозиционирования порожних контейнеров

Для принятия решения по репозиционированию контейнеров из порта с профицитом порожнего оборудования в порт с дефицитом необходимо рассчитать затраты на хранение порожних контейнеров и стоимость транспортировки контейнеров между двумя портами.

Рассмотрим затраты на хранение в порту порожнего оборудования с точки зрения стока контейнерной линии (1):

$$P_{\text{хран}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{\text{ск}i}(t) \quad (1)$$

Где $P_{\text{хран}}(t)$ – затраты на хранение парка порожних контейнеров;

$P_{\text{ск}i}(t)$ – складские затраты на сверхнормативное хранение порожних контейнеров;

t – общее время хранения контейнера в стоке после растарки, является параметром, определяемым по результат исследований отдела продаж контейнерной линии или грузового агента в порту;

i – порядковый номер контейнера в множестве всех рассматриваемых контейнеров;

N – количество хранимых порожних контейнеров.

Рассмотрим складские затраты (2) и затраты на погрузо-разгрузочные работы в порту погрузки (POL) и в порту выгрузки (POD) (3):

$$P_{\text{ск}}(t) = n * t_{\text{пл.х.}} * r = n * (t - t_{\text{б.х.}}) * r \quad (2)$$

$$P_{\text{прр}} = n * (d_{\text{погр}} + d_{\text{выгр}}) \quad (3)$$

Где n – количество контейнеров;

$t_{\text{пл.х.}}$ – время платного хранения в стоке;

r – ставка на сверхнормативное хранение в стоке;

$t_{\text{б.х.}}$ – время бесплатного хранения в стоке;

$P_{\text{прр}i}$ – затраты на погрузо-разгрузочные работы;

$d_{\text{погр}}, d_{\text{выгр}}$ – стоимость погрузки и выгрузки контейнера с учетом погрузо-разгрузочных работ, сдачи контейнеров в сток и подвоз их на погрузку в POL.

Рассмотрим затраты на репозиционирование порожних контейнеров из порта погрузки с профицитом контейнеров (POL) в порт выгрузки с дефицитом порожних контейнеров (POD) (4):

$$P_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{тр}i} = \sum_{i=1}^N (n_i * f) \quad (4)$$

Где $P_{\text{тр}}$ – общие транспортные расходы на перевозку;

$P_{\text{тр}i}$ – затраты на партию порожних контейнеров;

f – стоимость морского фрахта за единицу порожнего контейнера;

Введем β – коэффициент экономической целесообразности передислокации, который показывает соотношение транспортных расходов по передислокации порожних контейнеров к расходам на хранение порожних контейнеров. Благодаря данной величине становится возможным определение необходимости вывоза порожних грузовых единиц и прогнозирование будущих финансовых затрат. Формула для расчета приведена ниже (5):

$$\beta(t) = \frac{P_{\text{хран}}^{\text{POL}}(t) + P_{\text{прр}} + P_{\text{хран}}^{\text{POD}}(t)}{P_{\text{тр}}} \quad (5)$$

где $\beta(t)$ – коэффициент экономической целесообразности передислокации порожних контейнеров;

$P_{\text{хран}}^{\text{POL}}(t)$ – затраты на хранение в порту с профицитом порожних контейнеров;

$P_{\text{хран}}^{\text{POD}}(t)$ – затраты на хранение в порту с дефицитом порожних контейнеров, образуются в случае, если выдача порожнего контейнера произведена после окончания бесплатного периода хранения.

Общее число порожних контейнеров в стоке POL и POD будет одинаковым, однако, контейнеры будут выданы не такими же партиями, поэтому для POD количество грузовых партий, выданных контейнеров будет обозначено, как M . Раскрыв выражение (5), получим следующую формулу (6):

$$\beta(t) = \frac{\sum_{i=1}^N P_{\text{ск}i}(t) + \sum_{i=1}^N (n_i * (d_{\text{погр}} + d_{\text{выгр}}))}{\sum_{i=1}^N (n_i * f)} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\sum_{j=1}^M P_{ckj}(t)}{\sum_{i=1}^N (n_i * f)} = \\
& = \frac{\sum_{i=1}^N (n_i * (r_i(t_i^{POL} - t_{6,x}^{POL}) + (d_{порг} + d_{выгр})))}{\sum_{i=1}^N (n_i * f)} + (6) \\
& + \frac{\sum_{j=1}^M (n_j * (r_j(t_j^{POD} - t_{6,x}^{POD})))}{\sum_{i=1}^N (n_i * f)}
\end{aligned}$$

Формула отражает затраты на хранение в профицитном стоке порожних контейнеров в POL, затраты на их погрузку и выгрузку в другом порту, затраты на хранение в дефицитном порту POD (в случае, если выдача порожнего оборудования произведена после окончания бесплатного хранения) и затрат на морскую перевозку порожних контейнеров.

Следует отметить, что в случае если порожние выданы до исхода срока бесплатного хранения, то $t_j^{POD} - t_{6,x}^{POD} < 0$, однако для удобства применения формулы примем, что $t_j^{POD} \geq t_{6,x}^{POD}$.

Использование коэффициента экономической целесообразности передислокации порожних контейнеров следует интерпретировать в зависимости от его значения. Ниже приведен пример интерпретации, значения могут быть изменены в зависимости от операционных показателей конкретной контейнерной линии, затрат на содержание стока в рассматриваемых портах и цен морской перевозки:

- 1) Если $\beta = 1$, то расходы на транспортировку равны расходам за хранение. Необходимо в кратчайшие

сроки организовать вывоз порожних контейнеров для снижения будущих потерь.

- 2) Если $\beta = (0.5 \dots 1)$, то есть необходимость в течение двух недель произвести вывоз определенной партии порожних контейнеров.
- 3) Если $\beta = (0 \dots 0.5]$, то нет необходимости в организации транспортировки порожних контейнеров. Рационально оставить грузовые единицы под хранением.

Закключение

В результате анализа, основанного на данных полученных из открытых источников, видно, что на уровне крупных портов проблемы дефицита/профицита порожних контейнеров не наблюдается. Подобные проблемы обычно возникают локально внутри отдельных компаний – собственников контейнеров и решаются в соответствии с оперативной ситуацией.

В данном исследовании предложен коэффициент экономической целесообразности передислокации порожних контейнеров, который может быть использован для принятия решений менеджментом контейнерной линии для оптимизации расходов по содержанию контейнерного парка и своевременному репозиционированию контейнеров между морскими портами. Предложена шкала оценки коэффициента, которая может быть адаптирована под конкретную контейнерную линию в зависимости от их операционных показателей и параметров хранения в рассматриваемых морских портах.

Литература

1. Brehmer B. Dynamic decision making: Human control of complex systems, ActaPsychologica. 1992, 81 (3), p. 211-241.
2. Дернер Д. Логика неудачи. М.: Смысл, 1997.
3. Sterman J. Misperceptions of Feedback in Dynamic Decision Making, Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1989a 43(3), p. 301-335.
4. Brehmer B. Strategies in Real Time, Dynamic Decision Making, R. Hogarth (ed.). Insights in Decision Making. Chicago: University of Chicago Press, 1990, p. 263-279.
5. Каталевский Д.Ю., Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие; 2-е изд., перераб. и доп., Д.Ю. Каталевский, М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015, 496 с.
6. Стрельников, Д.Д. Совершенствование методики прогнозирования времени выполнения портовых перегрузочных процессов в морских портах: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.19 Стрельников Денис Дмитриевич; [Место защиты: Волжский государственный университет водного транспорта]. Нижний Новгород, 2019, 24 с.
7. Strelnikov D., Rudnitskaia, J. Finding an optimal route of a consignment in a seaport, 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2019, 2019, p. 29–33.
8. Перминова, А. А. Прогнозирование спроса на контейнерные перевозки, Вестник транспорта. 2017. № 6. С. 23-27. EDN YSZMAP.
9. Котельников, В. Г. Управление деятельностью предприятий сервиса грузовых контейнерных перевозок на основе прогнозов развития событий. В. Г. Котельников, Д. А. Моисеенкова, Техничко-технологические проблемы сервиса. 2009, № 2(8), С. 72-75, EDN MQIYBN.
10. Сысоенко, М. В. Опыт оптимизации контейнерных перевозок и прогноз развития новых контейнерных маршрутов. М. В. Сысоенко, А. И. Беленкова, Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Москва, 28 апреля 2022 года, Редакция: Л.К. Гуриева, З.Ш. Бабаева [и др.]. Москва: ООО "ИРОК", ИП Овчинников Михаил Артурович (Типография Алеф), 2022, С. 212-217, EDN BRZPFL.
11. Деружинский, В. Е. Математическая модель оптимизации контейнерных перевозок в интермодальных сообщениях. В. Е. Деружинский, Э. К. Аблязов, Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2019, № 2(27), С. 5-10, EDN OAFCKC.
12. Телегин, А. И. Метод определения стандартных показателей качества грузовых перевозок. А. И. Телегин, А. О. Ничипорук, Н. В. Гончарова, Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология : сборник трудов II международной научно-практической конференции, Якутск, 16–17 апреля 2020 года. Якутск: Якутский институт водного транспорта (филиал) Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта», 2020, С. 250-255, EDN ATKXPV.

References

1. Brehmer B. Dynamic decision making: Human control of complex systems, Acta Psychologica. 1992, 81 (3), p. 211-241.
2. Derner D. Logika neudachi, [The logic of failure], Smysl, 1997.
3. Sterman J. Misperceptions of Feedback in Dynamic Decision Making, Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1989a 43(3), p. 301-335.
4. Brehmer B. Strategies in Real Time, Dynamic Decision Making, R. Hogarth (ed.). Insights in Decision Making. Chicago: University of Chicago Press, 1990, p. 263-279.
5. Katalovskiy D.Yu., Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii [Fundamentals of simulation modeling and system analysis in management], Moscow: Izdatel'skiy dom «Delo» RANKhiGS, 2015, 496 p.
6. Strelnikov, D.D. Sovershenstvovanie metodiki prognozirovaniya vremeni vypolneniya portovykh peregruzochnykh protsessov v morskikh portakh [Improvement of the methodology for predicting the execution time of port transshipment processes in seaports], PhD dissertation, Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta, Nizhniy Novgorod, 2019, 24 p.
7. Strelnikov D., Rudnitskaia, J. Finding an optimal route of a consignment in a seaport, 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2019, 2019, p. 29–33.
8. Perminova, A. A. Prognozirovaniye sprosa na kontejnernye perevozki [Forecasting the demand for container transportation], Vestnik transporta. 2017. № 6. S. 23-27. EDN YSZMAP.
9. Kotelnikov, V. G. Upravlenie deyatel'nost'yu predpriyatij servisa gruzovykh kontejnernykh perevozok na osnove prognozov razvitiya sobytij [Managing the activities of container cargo transportation service enterprises based on forecasts of the development of events]. Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. 2009. № 2(8). S. 72-75. EDN MQIYBN.
10. Sysenko, M. V. Opyt optimizatsii kontejnernykh perevozok i prognoz razvitiya novykh kontejnernykh marshrutov / M. V. Sysenko, A. I. Belenkova [Experience in optimization of container transportation and forecast of development of new container routes]. Vyzovy sovremennosti i strategii razvitiya obshchestva v usloviyakh novoy real'nosti : Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, Moskva, 28 aprelya 2022 goda / Redkollegiya: L.K. Gurieva, Z.SH. Babaeva [i dr.]. Moskva: OOO "IROK", IP Ovchinnikov Mihail Arturovich (Tipografiya Alef), 2022. S. 212-217. EDN BRZPFL.
11. Deruzhinskij, V. E. Matematicheskaya model' optimizatsii kontejnernykh perevozok v intermodal'nykh soobshcheniyah [Mathematical model of optimization of container transportation in intermodal communications] /. Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova. 2019. № 2(27). S. 5-10. EDN OAFCKC.
12. Telegin, A. I. Metod opredeleniya standartnykh pokazatelej kachestva gruzovykh perevozok [Method for determining standard indicators of freight transport quality]. Transportnye sistemy: bezopasnost', novye tekhnologii, ekologiya : sbornik trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, YAkutsk, 16–17 aprelya 2020 goda. – YAkutsk: YAkutskij institut vodnogo transporta (filial) Federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya «Sibirskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta», 2020. S. 250-255. EDN ATKXPV.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Стрельников Денис Дмитриевич, кандидат технических наук, ведущий менеджер по оперативному планированию CStar Line FZE, доцент кафедры технология транспортных процессов и управление на водном транспорте, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93 e-mail: strelnikov.denis@mail.ru

Denis D. Strelnikov, Ph.D. (Eng), Operation Lead Manager CStar Line FZE, assistant professor of the Department of Technology of Transport Processes and Management on Water Transport, Maritime State University named after Adm. F.F. Ushakov, 353918, Novorossiysk, Lenin Ave. 93, e-mail: strelnikov.denis@mail.ru

Стрельникова Инесса Анатольевна, кандидат экономических наук, заведующая кафедрой и доцент кафедры технология транспортных процессов и управление на водном транспорте, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина 93 e-mail: strelnikova.ia@inbox.ru

Артамонова Мария Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры технология транспортных процессов и управление на водном транспорте, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина 93 e-mail: mashenika2005@yandex.ru

Колбасин Сергей Сергеевич, магистрант 1 курса направления подготовки управление на водном транспорте и гидрографическое обеспечение судоходства, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина 93, специалист по контролю фрахтовых сборов СКФ ТМ. e-mail: sknvrsk@bk.ru

Inessa A. Strelnikova, Ph.D. (Econ), Head of the Department and assistant professor of the Department Technology of Transport Processes and Management on Water Transport, Maritime State University named after Adm. F.F. Ushakov, 353918, Novorossiysk, Lenin Ave. 93 e-mail: strelnikova.ia@inbox.ru

Maria U. Artamonova, Ph.D. (Econ), assistant professor of the Department Technology of Transport Processes and Management on Water Transport, Maritime State University named after Adm. F.F. Ushakov, 353918, Novorossiysk, Lenin Ave. 93 e-mail: mashenika2005@yandex.ru

Sergey S. Kolbasin, 1st year master's student of the direction of education water transport management and hydrographic support of navigation, Maritime State University named after Adm. F.F. Ushakov, 353918, Novorossiysk, Lenin Ave., Freight collection specialist SCF TM. 93 e-mail: sknvrsk@bk.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 13.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2023.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 629.12: 621.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.032>

Критерий энергоэффективности при проектировании системы водоснабжения судна

Великанов Н.Л.¹ nikolaj.velikanov@klgtu.ru, Наумов В.А.¹ vladimir.naumov@klgtu.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Рассмотрено судно проекта RDB 63.01, разработанного проектно-конструкторским бюро «Стапель». Тип судна – самоходное сухогрузное судно. Назначение судна – перевозка минерально-строительных материалов, тарно-штучных, навалочных и генеральных грузов, включая зерно и опасные грузы (уголь и сера). В системе водоснабжения судна использован вихревой насос. Вихревые насосы имеют ряд выгодных преимуществ, по сравнению с центробежными насосами. Среди них меньшая масса и размеры, при одинаковых с центробежными насосами величинах подачи и напора. Долгое время именно это преимущество способствовало использованию в судовых условиях применению вихревых насосов. Представлены нагрузочные характеристики вихревого насоса 1.5CWX-2A, центробежного насоса ЦН СМ-3-6, полученные по экспериментальным данным производителя и по эмпирическим зависимостям. Для этих же насосов рассчитаны показатели энергетической эффективности и удельной энергетической эффективности. Приведена диаграмма энергетических затрат на перекачивание воды за рейс судна. Показано, что при проектировании судовых насосных систем целесообразно также принять во внимание показатели энергетической эффективности.

Ключевые слова: вихревой насос, система водоснабжения судна, величина подачи и напора, удельная энергетическая эффективность.

Финансирование: Работа выполнена в рамках поисковой темы «Обеспечение технической эксплуатации конструкций корпуса, гидромеханические аспекты работы морских систем и их подсистем» (№ 01-21-001.2).

Для цитирования: Великанов Н.Л., Наумов В.А. Критерий энергоэффективности при проектировании системы водоснабжения судна, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 271—276. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.032

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.032>

The criterion of energy efficiency in the design of the ship's water supply system

Nikolay L. Velikanov¹ nikolaj.velikanov@klgtu.ru, Vladimir A. Naumov¹ vladimir.naumov@klgtu.ru,

¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. The vessel of the RDB 63.01 project, developed by the design bureau "Stapel", is considered. The type of vessel is a self-propelled dry cargo vessel. The purpose of the vessel is the transportation of mineral and construction materials, bulk, bulk and general cargo, including grain and dangerous goods (coal and sulfur). A vortex pump is used in the ship's water supply system. Vortex pumps have a number of advantageous advantages compared to centrifugal pumps. Among them are smaller weight and dimensions, with the same values of supply and pressure with centrifugal pumps. For a long time, it was this advantage that contributed to the use of vortex pumps in ship conditions. The load characteristics of the 1.5CWX-2A vortex pump and the CM-3-6 centrifugal pump obtained from the manufacturer's experimental data and empirical dependences are presented, energy efficiency and specific energy efficiency indicators are calculated for the same pumps. The diagram of energy costs for pumping water during the voyage of the vessel is given. It is shown that when designing marine pumping systems, it is also advisable to take into account energy efficiency indicators.

Key words: vortex pump, water supply system of the vessel, the amount of supply and pressure, specific energy efficiency.

Financial Support: The work was carried out within the framework of the search topic "Maintenance of technical operation of hull structures, hydro-mechanical aspects of marine systems and their subsystems" (No. 01-21-001.2).

For citation: Nikolay L. Velikanov, Vladimir A. Naumov, The criterion of energy efficiency in the design of the ship's water supply system, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 271—276. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.032

Введение

При проектировании судовых гидравлических систем важную роль играет подбор насосных установок. Поэтому анализу рабочих характеристик судовых насосов и трубопроводов посвящено большое количество публикаций [1-9]. Энергоэффективность становится все более актуальной в нынешних экономических и экологических ситуациях. В работе [1] предпринята попытка составления карты современного состояния энергоэффективности в морском секторе, как в масштабе отдельных судов, так и всей отрасли в целом. Первым интересным моментом является изучение нормативно-правовой базы сектора судоходства в отношении энергоэффективности [1].

Процедуры, применяемые на судах с целью снижения их потребления и выбросов, варьируются от внесения изменений в конструкцию до методов эксплуатации. За этим последуют потенциальные достижения, которые отрасль могла бы внедрить в более широком масштабе для повышения эффективности всего сектора.

Рассмотрен обзор основных препятствий на пути осуществления этих мер. В то время как действующие стандарты являются временным решением, а некоторые из наиболее заметных улучшений требуют дальнейшего изучения, постоянные усилия увеличивают потенциал этого сектора для оптимизации.

Суда снабжаются водой из различных источников: непосредственно из системы коммунального хозяйства в порту, с судов водоснабжения или барж, бутилированной водой, льдом или, если возможно производство воды на борту, с помощью таких процессов, как опреснение и обратный осмос [2]. Все элементы судовой системы водоснабжения подвержены воздействию различных факторов, которые могут оказать негативное влияние на безопасность воды на борту или на здоровье человека. Стандарты питьевой воды одинаковы как для судов, так и для наземных объектов. Управление питьевой водой на судах осуществляется в соответствии с гигиеническими стандартами, применяемыми по всей цепочке поставок, от источника до места потребления.

Исследование [3] строится на сочетании производства воды и бункеровки водой в портах. Такой подход основан на более эффективном использовании емкости судовых резервуаров в отношении производства воды на борту.

Рассмотрим судно проекта RDB 63.01, разработанного проектно-конструкторским бюро «Стапель» [10]. Тип судна – самоходное сухогрузное судно с тремя грузовыми трюмами, оборудованными водонепроницаемыми люковыми закрытиями съемного типа, с машинным отделением и надстройкой в корме. Назначение судна – перевозка минерально-строительных материалов, тарно-штучных, навалочных и генеральных грузов, включая зерно и опасные грузы (уголь и сера). Перемещение крышек выполняется судовым козловым краном.

Длина судна габаритная – 111,3 м. Ширина габаритная – 16,5 м. Высота борта – 5,8 м.

Осадка в реке по ЛГВЛ – 3,6 м. Объем грузовых трюмов – 6269 м³. Водоизмещение порожнем – 1941 т. Грузоподъемность в реке – 3500 т, в море – 5000 тонн. Осадка порожнем – 1,24 м.

Осадка в море по ЛГВЛ – 4,3 м. Мощность гл. двигателей 2х720 кВт. Автономность плавания – 13 сут. Скорость хода – 11 узл. Экипаж – 12 чел. Класс судна – + М-СП 4,5 (лед 10) А.

На судне предусмотрена система хозяйственно-питьевого водоснабжения. Запас питьевой воды хранится в двух вкладных цистернах питьевой воды. Цистерны питьевой воды изготавливаются из пищевой нержавеющей стали. Днище цистерн выполнено с уклоном. Пополнение запаса бытовой пресной воды осуществляется через стандартные фланцевые соединения для приема воды, установленные на палубе юта. При приеме воды предусматривается возможность её обработки при помощи ультрафиолетового стерилизатора. На судне устанавливается станция приготовления воды Alfa Laval. Цистерны и оборудование устанавливается в помещении водоподготовки, расположенном на главной палубе. По проекту питьевая вода в камбуз, прачечную, душевые, санитарные помещения, санитарные блоки кают и в подогреватели воды подается вихревым насосом (ВН) 1.5CWX-2A, номинальная подача 3 м³/час (0,833 дм³/с), напор – 40 м, масса – 63 кг.

1. Характеристики вихревого насоса

Считается, что ВН имеют ряд преимуществ, по сравнению с центробежными насосами (ЦН). Среди них меньшая масса и размеры, при одинаковых с ЦН величинах подачи и напора. Долгое время именно это преимущество способствовало использованию в судовых условиях применению ВН. На наш взгляд, при проектировании судовых насосных систем целесообразно также принять во внимание показатели энергетической эффективности (ЭЭ.)

На рис. 1 представлены нагрузочные характеристики ВН 1.5CWX-2A. С увеличением подачи мощность, затрачиваемая ВН, уменьшается. Рабочие характеристики этого ВН, как в [8], могут быть аппроксимированы прямыми по формулам (1):

$$H \equiv f_1(Q) = H_0 - \alpha Q, N \equiv f_2(Q) = N_0 - \beta Q, \quad (1)$$

где Q – подача насоса дм³/с, H – напор насоса, м; N – затраченная мощность насоса, кВт.

Константы H_0 , α , N_0 , β в формулах (1) определяются по опытным данным методом наименьших квадратов. У 1.5CWX-2A на рис. 1 и 2: $H_0=91,07$ м; $N_0=3,11$ кВт; $\alpha=61,01$ м/(дм³/с); $\beta=1,39$ кВт/(дм³/с).

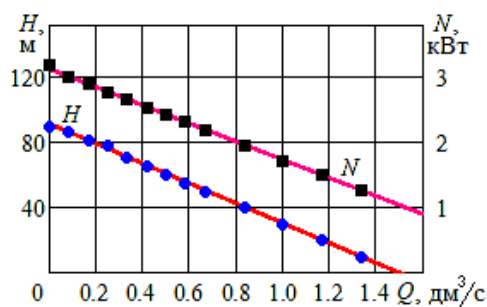


Рис. 1. Нагрузочные характеристики ВН 1.5CWX-2A. Точки – экспериментальные данные [11], линии – результаты расчета по (1)

В стандартной конфигурации рассматриваемый насос снабжается электродвигателем мощностью 2,2

кВт. Видимо, во время заводских испытаний был установлен электродвигатель большей мощности, чтобы получить экспериментальные точки при малых значениях подачи (см. рис. 2). В судовых условиях пуск ВН осуществляется при полностью открытом клапане на нагнетательном трубопроводе, чтобы подача была не менее 0,7 дм³/с.

КПД ВН в процентах можно рассчитать по формуле (2):

$$\eta = 100 \rho g H Q / N = Q f_1(Q) / f_2(Q). \quad (2)$$

Для оценки ЭЭ систем водоснабжения в последнее время и успешно используют показатель удельных энергетических затрат (УЭЗ) E (см., например, [12, 13]), который рассчитывается по формуле (3):

$$E = N / Q = f_2(Q) / Q. \quad (3)$$

По рис. 2 видно, что при небольших значениях Q и КПД, и УЭЗ с увеличением подачи одинаково показывают улучшение энергетической эффективности (КПД растет, УЭЗ падает). Однако, после достижения максимума функция $\eta(Q)$ показывает ухудшение ЭЭ. Тогда как функция $E(Q)$ монотонно убывает, показывая улучшение ЭЭ.

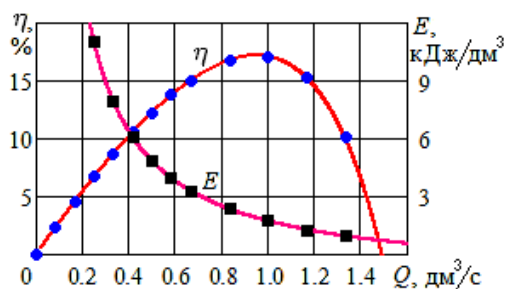


Рис. 3. Показатели энергетической эффективности ВН 1.5CWX-2A. Точки – экспериментальные данные [11], линии – результаты расчета по (2)

2. Характеристики центробежного насоса

В качестве альтернативы рассмотрим горизонтальные многоступенчатые электронасосы производства Дании [14], Китая [15] и России [16]. Необходимые номинальные параметры ($Q=3$ м³/час, $H=40$ м) имеются у ЦН с 6-ю ступенями.

ЦН названных компаний имеют близкие характеристики. Рассмотрим их на примере ЦН Grundfos. Базовая версия СМЕ оснащена электродвигателем без преобразователя частоты, масса всего 14,2 кг. Электродвигатель насосов СМЕ имеет встроенный преобразователь частоты. Исполнения в соответствии с требованиями работы в судовых условиях увеличивает массу агрегата. Но она все равно остается меньшей, чем масса ВН, предусмотренного в рассматриваемом проекте.

Характеристики ЦН СМ-3-6, как в [9], могут быть аппроксимированы многочленами 2-го порядка по формулам (4):

$$f_1(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2, f_2(Q) = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2, \quad (4)$$

где константы в формулах (4) были определены по опытным данным методом наименьших квадратов:

$$a_0=56,06 \text{ м}; a_1=-5,91 \text{ м}/(\text{дм}^3/\text{с}); a_2=-16,18 \text{ м}/(\text{дм}^3/\text{с})^2;$$

$$b_0=0,272 \text{ кВт}; b_1=0,683 \text{ кВт}/(\text{дм}^3/\text{с});$$

$$b_2=-0,296 \text{ кВт}/(\text{дм}^3/\text{с})^2;$$

По рис. 3 результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. Показатели энергетической эффективности ЦН СМ-3-6 были рассчитаны по формулам (2). На рис. 5 качественно разница в изменении функций $\eta(Q)$ и $E(Q)$ такая же, как на рис. 2. Но показатели ЭЭ у ЦН СМ-3-6 заметно выше, чем у ВН 1.5CWX-2A. Поэтому целесообразно оценивать ЭЭ насосов по УЭЗ, а не по КПД. Показатели УЭЗ насосов двух других компаний были рассчитаны аналогичным образом.

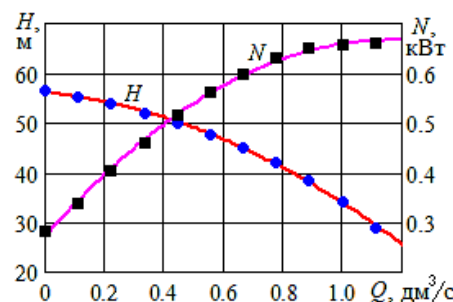


Рис. 3. Нагрузочные характеристики ЦН СМ-3-6. Точки – экспериментальные данные [14], линии – результаты расчета по (4)

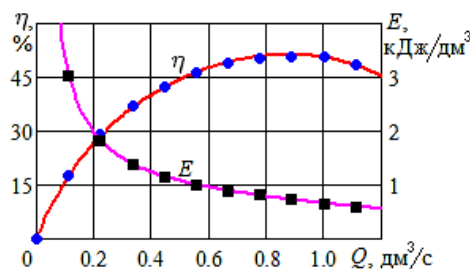


Рис. 4. Показатели энергетической эффективности ЦН СМ-3-6. Точки – экспериментальные данные [14], линии – результаты расчета по (2)

3. Сравнение показателей эффективности

На рис. 5 приведено сравнение показателей УЭЗ трех насосов с требуемой в рассматриваемом проекте подачей и напором. Видно, что различие УЭЗ разных центробежных насосов невелико, но много меньше, чем у вихревого насоса 1.5CWX-2A.

В таблице 1 приведены значения показателей энергетической эффективности четырех насосов, рассчитанные при $Q=3$ м³/час, $H=40$ м. Заметим, что масса современных ЦН (даже в судовом исполнении) не превосходит массу ВН.

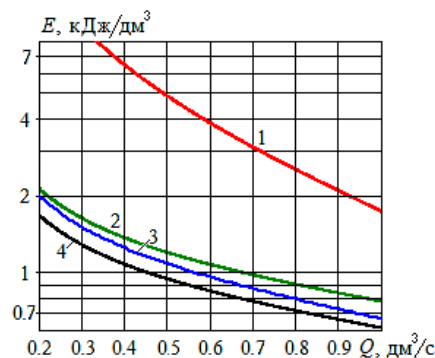


Рис. 5. Показатели УЭЗ насосов: 1 – 1.5CWX-2A; 2 – ЦМС-3-40; 3 – СМ-3-6; 4 – CNP-3-70

Таблица 1

Показатели энергоэффективности насосов

№	Насос	N, кВт	η , %	E, кДж/дм ³
1	1.5CWX-2A	1,956	16,8	2,35
2	ЦМН-3-6	0,726	45,0	0,87
3	СМ-3-6	0,635	51,3	0,76
4	CNP-3-70	0,572	59,1	0,69

Оценим энергетические затраты судовой системы водоснабжения за 13-суточное автономное плавание при экипаже 12 человек. По действующему нормативному документу [17] на морских судах, а также на судах, совершающие рейсы продолжительностью более 3 календарных дней, установлена минимальная норма водопотребления на человека - 150 л/сут. Итого за рейс – 23400 л (23,4 м³). Учтем КПД электродвигателя, по каталогу [15] при $Q=3\text{ м}^3/\text{час}$ он составляет $\eta_E=0,779$. Рассчитанный объем необходимо умножить на соответствующий показатель УЭЗ с рис. 5. Полученные величины приведены на рис. 6, где номер столбика соответствует номеру насоса в табл. 1.

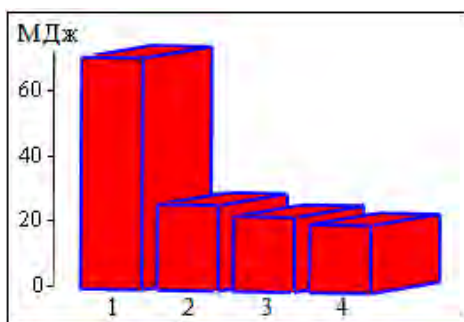


Рис. 6. Диаграмма энергетических затрат на перекачивание воды за рейс судна

Заключение

Получены математические модели и представлен алгоритм оценки энергетической эффективности работы судовой системы водоснабжения. Предложено использовать показатель удельных энергетических затрат, позволяющий наряду с КПД более детально проводить сравнения разных насосов. Заметим, что показатель УЭЗ не является универсальным критерием энергетической эффективности насоса, но дает дополнительную информацию. Это позволяет в частных случаях (совместно с КПД) более объективно оценить энергоэффективность проектируемой установки.

Проведено сравнение результатов расчетов для четырех насосов (один вихревой и 3 центробежных) при выполнении одной и той же задачи. Представлена диаграмма энергетических затрат на перекачивание воды за рейс судна. Результаты могут быть использованы при выполнении расчетов, предшествующих выбору оборудования судовых систем водоснабжения.

Литература

1. Barreiro J., Zaragoza S., Diaz-Casas V. Review of ship energy efficiency. Ocean Engineering. 2022. Vol. 257, Paper ID 111594.
2. Mulić R, Jerončić T.I. Supplying ships with safe drinking-water. International Maritime Health. 2020. Vol. 71(2), pp.123-128.
3. Krile S. Fresh water supply from different sources in the shipping. Procedia Engineering. 2016. Vol. 149, pp. 190-196.
4. Сахно К. Н., Сергеев П. Ю. Современное состояние вопроса проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов судовых систем. Постановка задач исследования // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2013. № 1. С. 54-60.
5. Сахно К.Н. Повышение технологичности трубопроводов судовых систем // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2011. № 1. С. 73-77.
6. Соловьев А.В., Бажан П.И., Голубев И.В. Энергетическая эффективность судов // Вестник ВГАВТ. 2017. Вып. 50. С. 260-267.
7. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И., Пыленок Д.А. Откачка воды из трюма погружным насосом // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2021. № 3 (57). С. 22-25.
8. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Анализ судовой гидравлической системы сбора и перекачивания нефтесодержащих вод // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4, часть 3. С. 110-115.
9. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Гидравлический проектный расчет судовой балластно-осушительной системы // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2023. № 1(63). С. 19-23.
10. Ростовское центральное проектно-конструкторское бюро «Стапель». Самоходное сухогрузное судно [Электронный ресурс]. URL: <https://www.stapel.ru/upload/iblock/40f/4rfaw5swfncxeko3tenu81kcu1mjdh0x.pdf> (дата обращения: 09.09.2023).
11. Series self-priming vortex pump [Electronic resource]. URL: <https://www.jinbomarine.com/1-5cwx-2a-bracket-series-self-priming-vortex-pump.html> (access date: 09.09.2023).
12. Николенко И.В. Анализ энергетической эффективности силовых агрегатов насосных станций систем водоснабжения и водоотведения по удельным показателям // Строительство и техногенная безопасность. 2020. № 18 (70). С. 143-147.

13. Ахмедова Н.Р., Наумов В.А. Критерии подобия автономной перекачивающей системы и их влияние на показатели энергетической эффективности // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 1. С. 74-87.
14. Горизонтальные многоступенчатые центробежные насосы Grundfos CM, CME. Каталог [Электронный ресурс]. URL: https://mnk-plus.ru/files/343/KATALOG_CM,CME.pdf (дата обращения: 09.09.2023).
15. Горизонтальные многоступенчатые центробежные насосы CNP. Каталог 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://nrg.ru/vse-serii-nasosov-cnp/chm-gorizontalnye-mnogostupenchatye-cnp> (дата обращения: 09.09.2023).
16. Компания «Насосы Ампики». Горизонтальный многосекционный насос для воды ЦМН-3-6 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ampika.ru/oborudovanie.html?id=21419> (дата обращения: 09.09.2023).
17. Санитарные правила СП 2.5.3650-20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры. Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации № 30 от 16.10.2020 г.

References

1. Barreiro J., Zaragoza S., Diaz-Casas V. Review of ship energy efficiency. Ocean Engineering. 2022. Vol. 257, Paper ID 111594.
2. Mulić R, Jerončić T.I. Supplying ships with safe drinking-water. International Maritime Health. 2020. Vol. 71(2), pp.123-128.
3. Krile S. Fresh water supply from different sources in the shipping. Procedia Engineering. 2016. Vol. 149, pp. 190-196.
4. Sakhno K. N., Sergeev P. Yu. Sovremennoe sostoyanie voprosa proektirovaniya, izgotovleniya i montazha truboprovodov sudovykh sistem. Postanovka zadach issledovaniya [The current state of the issue of designing, manufacturing and installation of pipelines of ship systems. Setting research objectives]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2013. No 1, pp. 54-60.
5. Sakhno K.N. Povyshenie tekhnologichnosti truboprovodov sudovykh system [Improving the manufacturability of pipelines of ship systems]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. No.1, pp. 73-77.
6. Solov'ev A.V., Bazhan P.I., Golubev I.V. Energeticheskaya effektivnost' sudov [Energy efficiency of ships]. Vestnik VГАVТ. 2017, vyp. 50, pp. 260-267.
7. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I., Pylenok D.A. Otkachka vody iz tryuma pogrulzhnym nasosom [Pumping water from the hold with a submersible pump]. Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. 2021. No. 3 (57), pp. 22-25.
8. Velikanov N.L., Naumov V.A. Analiz sudovoy gidravlicheskoj sistemy sbora i perekachivaniya neftesoderzhashchikh vod [Analysis of the marine hydraulic system for collecting and pumping oily waters]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2022. № 4, chast' 3, pp. 110-115.
9. Velikanov N.L., Naumov V.A. Gidravlicheskiy proektnyy raschet sudovoy ballastno-osushitel'noy sistemy [Hydraulic design calculation of the ship's ballast and drainage system]. Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. 2023. No. 1(63), pp. 19-23.
10. Rostovskoe tsentral'noe proektno-konstruktorskoe byuro «Stapel». Samokhodnoe sukhogruznoe sudno [Rostov Central design Bureau "Stapel". Self-propelled dry cargo vessel]. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.stapel.ru/upload/iblock/40f/4rfaw5swfncxeko3tenu81kcu1mjd0x.pdf> (access date: 09.09.2023).
11. Series self-priming vortex pump [Electronic resource]. URL: <https://www.jinbomarine.com/1-5cwx-2a-bracket-series-self-priming-vortex-pump.html> (access date: 09.09.2023).
12. Nikolenko I.V. Analiz energeticheskoy effektivnosti silovykh agregatov nasosnykh stantsiy sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya po udel'nym pokazatelyam [Analysis of energy efficiency of power units of pumping stations of water supply and sanitation systems by specific indicators]. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2020. № 18 (70), pp. 143-147.
13. Akhmedova N.R., Naumov V.A. Kriterii podobiya avtonomnoy perekachivayushchey sistemy i ikh vliyanie na pokazateli energeticheskoy effektivnosti Similarity criteria of an autonomous pumping system and their impact on energy efficiency indicators [Similarity criteria of an autonomous pumping system and their impact on energy efficiency indicators]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2022. Vol. 12. No. 1, pp. 74-87.
14. Gorizonta'nye mnogostupenchatye tsentrobezhnye nasosy Grundfos SM, SME. Katalog [Horizontal multistage centrifugal pumps Grundfos CM, CME. Catalog]. [Elektronnyy resurs]. URL: https://mnk-plus.ru/files/343/KATALOG_CM,CME.pdf (access date: 09.09.2023).
15. Gorizonta'nye mnogostupenchatye tsentrobezhnye nasosy CNP. Katalog 6 [Horizontal multistage centrifugal pumps CNP. Catalog 6]. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://nrg.ru/vse-serii-nasosov-cnp/chm-gorizontalnye-mnogostupenchatye-cnp> (access date: 09.09.2023).
16. Kompaniya «Nasosy Ampika». Gorizonta'nyy mnogosektsionnyy nasos dlya vody TsMN-3-6 [Ampika Pumps Company. Horizontal multi-section water pump CMN-3-6]. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.ampika.ru/oborudovanie.html?id=21419> (access date: 09.09.2023).
17. Sanitarnye pravila SP 2.5.3650-20. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otidel'nym vidam transporta i ob'ektam transportnoy infrastruktury [Sanitary rules of SP 2.5.3650-20. Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities]. Utv. postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii № 30 ot 16.10.2020 g.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Великанов Николай Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru.

Nikolay L. Velikanov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru.

Наумов Владимир Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности и природообустройства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

Vladimir A. Naumov Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Technosphere Safety and Environmental Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 18.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 24.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 25.10.2023.

Научная статья

УДК 639.3; 519.6; 004.94; 57.024

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.033>

Моделирование поведения рыб в ограниченном пространстве

Ражев А.О.¹ root@digitechlab.ru, Недоступ А.А.² nedostup@kgtu.ru

¹ООО «Лаборатория цифровых технологий», ²ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

Аннотация. В статье изложено решение задачи разработки математических и имитационных моделей, описывающих поведение рыб в садках, установленных в море, и бассейнах установок замкнутого водоснабжения. Приведена математическая и имитационная модели. Представлены реализация в виде программы для ЭВМ, результаты моделирования в виде визуализации трехмерной сцены с оценкой производительности модели. Цель исследования: описание поведения и биомеханики рыбы при помощи математических моделей с применением цифровых технологий. Научная новизна: применение междисциплинарного подхода для достижения поставленной цели; оптимизация алгоритмов имитационного моделирования для работы на современных многопроцессорных и гетерогенных вычислительных системах широкого применения; попытка совмещения технологий математического моделирования, машинного зрения и искусственного интеллекта, виртуальной и дополненной реальности. Области применения программного продукта: научные исследования, проектирование и эксплуатация рыбоводных ферм, системы виртуальной реальности, тренажерные комплексы, процесс обучения.

Ключевые слова: поведенческая модель рыбы, биомеханика, аквакультура, гетерогенная вычислительная система.

Финансирование: Исследование выполнено в ООО «Лаборатория цифровых технологий» за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00010, <https://rscf.ru/project/23-21-00010/>.

Для цитирования: Ражев А.О., Недоступ А.А. Компьютерная имитация поведения рыб в замкнутой системе водоснабжения, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 277—284. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.033

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.033>

Modeling of fish behavior in a confined space

Alexey O. Razhev¹ root@digitechlab.ru, Alexander A. Nedostup² nedostup@kgtu.ru

¹DigiTech Laboratory, LLC, Kaliningrad, Russian Federation,

²Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The article presents a solution to the problem of developing mathematical and simulation models describing the behavior of fish in cages installed in the sea and tanks of recirculating aquaculture systems. Mathematical and simulation models are given. The implementation is presented in the form of a computer program, the simulation results are presented in the form of visualization of a three-dimensional scene with an assessment of the performance of the model. The purpose of the study is to describe the behavior and biomechanics of fish using mathematical models using digital technologies. Scientific novelty: the application of an interdisciplinary approach to achieve this goal; optimization of simulation algorithms to work on modern multiprocessor and heterogeneous computing systems of wide application; an attempt to combine mathematical modeling technologies, machine vision and artificial intelligence, virtual and augmented reality. Areas of application of the software product: scientific research, design and operation of fish farms, virtual reality systems, training complexes, the learning process.

Key words: behavioral model of fish, biomechanics, aquaculture, heterogeneous computing system.

Financial Support: The research was carried out in DigiTech Laboratory at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-21-00010), <https://rscf.ru/project/23-21-00010/>.

For citation: Alexey O. Razhev, Alexander A. Nedostup. Computer simulation of fish behavior in a recirculating aquaculture system, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 277—284. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.033

Введение

Производство продукции товарной аквакультуры (товарного рыбоводства) и искусственное воспроизводство водных биологических ресурсов является приоритетным направлением стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. Выращивание рыб в море (морская аквакультура) представляет собой развивающийся подход, при котором рыбные фермы

располагаются в более глубоких и менее защищенных водах на некотором расстоянии от побережья, где объект рыборазведения подвергается воздействию более естественных условий обитания с более сильными океанскими течениями и более разнообразным поступлением питательных веществ [1].

В море и других естественных водоемах рыба выращивается в ограниченном пространстве – сетчатых садках (см. рис 1).

В искусственных водоемах – установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) рыба выращивается в бассейнах (см. рис. 2), где ее жизненное пространство также ограничено.



Рис. 1. Садки аквакультуры в море



Рис. 2. Установка замкнутого водоснабжения

Ограниченность жизненного пространства рыбы в садке аквакультуры или бассейне УЗВ влияет на ее поведенческие характеристики. Для увеличения рыбопродуктивности, сокращения экономических затрат, переходу к высокопродуктивному и экологически чистому аква-хозяйству необходима выработка правильных режимов рыборазведения, что в свою очередь требует понимание зависимости поведения рыбы от условий ее обитания.

1. Постановка задачи

Целью проводимого междисциплинарного исследования является описание поведения и биомеханики рыбы при помощи математических моделей с применением цифровых технологий, что соответствует приоритету научно-технического развития Российской Федерации по переходу к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

В рамках проводимого авторами научного исследования одной из задач является разработка математических и имитационных моделей, описывающих биомеханику рыбы [2] в ограниченном пространстве с учетом их реакции на воздействие абиотических и биотических факторов, оптимизированных для вычислений на многоядерных и гетерогенных вычислительных системах.

2. Материалы и методы

Рассмотрим реализацию компьютерной имитации поведения рыб в ограниченном пространстве. В разработанной математической модели движение каждой особи рыбы описывается системой дифференциальных уравнений движения в векторной форме, связывающих положение в пространстве $\mathbf{x}$ и скорость особи $\mathbf{v}$ в заданный момент времени t с развиваемой особью силой $\mathbf{F}$ и ее массой m при заданных начальных условиях:

$$\begin{cases} d\mathbf{x} / dt = \mathbf{v}(t) \\ m(d\mathbf{v} / dt) = \mathbf{F} \end{cases}$$

Сила $\mathbf{F}$ зависит как от восприятия особью внешней обстановки, так и от ее внутреннего состояния, характеризующегося элементом случайности. В разработанной математической модели вычисляются следующие составляющие $\mathbf{F}$, зависящие от: текущей скорости особи; скорости приближения особи к стационарным препятствиям (сетной части садка аквакультуры, стенкам бассейна, поверхности воды и др.) и удаления от них; удаленности до движущегося объекта (другой особи, корма и др.); скорости движения объекта и другой особи относительно рассматриваемой особи.

За основу разработанной математической модели была взята разработанная авторами статьи математическая модель движения стаи рыб при облове разноглубинным тралом [3] в условиях морского промысла. Указанная модель была переработана так, чтобы для определения вектора состояния каждой особи на текущем временном слое имитационного алгоритма учитывать векторы состояния особей в ограниченном пространстве только с предыдущего временного шага. При этом результат расчета для отдельно взятой особи влияет только на ее вектор состояния. Ниже приведены основные математические зависимости модели:

$$\mathbf{F}_1 = a(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v})(\mathbf{v} - \mathbf{v}_2)\mathbf{v}, \quad \mathbf{v}_1 < \mathbf{v}_2,$$

$$\mathbf{F}_2 = k(r_m / r - 1)\mathbf{r}, \quad r_m > r,$$

$$\mathbf{F}_3 = \begin{cases} sk^+ \mathbf{v}_r (r^+ / r - 1)\mathbf{r}, & r^+ > r, \quad \mathbf{v}_r < 0 \\ sk^- \mathbf{v}_r (r^- / r - 1)\mathbf{r}, & r^- > r, \quad \mathbf{v}_r > 0 \end{cases},$$

$$\mathbf{F}_4 = sbr / r,$$

$$\mathbf{F}_5 = scv_r / M,$$

$$b = \begin{cases} (k_{b2} - k_{b1}) / \alpha_1 + k_{b1}, & 0 < r \leq \alpha_1 \\ k_{b2}, & \alpha_1 < r \leq \alpha_2 \\ 0, & r > \alpha_2 \end{cases},$$

$$c = \begin{cases} k_c, & 0 < r \leq \delta \\ 0, & r > \delta \end{cases},$$

$$s = s_1 + s_2 \mathbf{or} / r,$$

где $\mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_5$ составляющие силы, развиваемой особью, $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \mathbf{F}_4 + \mathbf{F}_5$; a – коэффициент

демпфирования; v_1 – номинальная скорость; v_2 – максимальная скорость; k – степень влияния удаленности особи от стенок бассейна, садка или поверхности воды; r_m – максимальное расстояние реакции; k^+ и k^- – степень влияния скорости приближения к стенке бассейна, садка или поверхности воды и удаления от них соответственно; r^+ – предельное расстояние действия силы, препятствующей приближению особи к стенке бассейна, садка или поверхности воды; r^- – предельное расстояние действия силы, препятствующей удалению особи от стенки бассейна, садка или поверхности воды; b и c – промежуточные величины, характеризующие степень реакции рыбы; k_{b1} и k_{b2} – реакция на ближнее и дальнее присутствие другой особи соответственно; a_1 – расстояние между парой особей, до которого степень реакции линейно возрастает; a_2 – расстояние между парой особей, дальше которого степень реакции не меняется; k_c – реакция на приближение/удаление особей друг к другу; δ – предельное расстояние до другой особи, дальше которого ее движение не оказывает воздействия; M –

количество особей в ограниченном пространстве; s – степень восприятия; $\mathbf{or}$ – скалярное произведение единичного вектора ориентации особи в пространстве $\mathbf{o}$ и вектора положения ближайшей точки внутренней поверхности бассейна, садка или воды относительно рыбы $\mathbf{r}$; s_1 – математическое ожидание степени восприятия; s_2 – ее дисперсия.

Алгоритм расчета состояния одинаковый для всех особей. Различаются только значения параметров (индивидуальны для каждой особи) и векторы состояния особей с предыдущего временного слоя, являющиеся для алгоритма входными данными. При расчете для каждой особи учитывается состояние всех особей.

Таким образом, разработанная имитационная модель хорошо распараллеливается, может работать на таких гетерогенных вычислительных системах, как современные персональные ЭВМ с многоядерным центральным процессором и графическим процессорами.

На рис. 3 показан метод распараллеливания имитационной модели.



Рис. 3. Имитационная модель

Результат расчета для каждой особи – только ее состояние на текущем временном шаге. Поскольку отсутствуют пересечения выходных данных, нет необходимости выполнять их синхронизацию в процессе параллельной обработки. Одновременный доступ возможен только к входным данным, которые в процессе расчета временного шага неизменны и эффективно кэшируются. Данная особенность имитационной модели позволяет существенно ускорить процесс расчета и производить его на гетерогенных вычислительных системах.

При трехмерной визуализации движения рыб с целью повышения реалистичности восприятия и более корректной настройке алгоритмов машинного зрения необходимо учитывать возможные столкновения особей друг с другом и стенками садка аквакультуры или бассейна УЗВ. Для этого в имитационной модели была реализована обработка столкновений [4]. Также, с учетом вектора скорости движения, необходимо производить корректную ориентацию в пространстве и изменение формы трехмерной модели рыбы.

На рис. 4 показан результат работы алгоритма изменения формы рыбы.

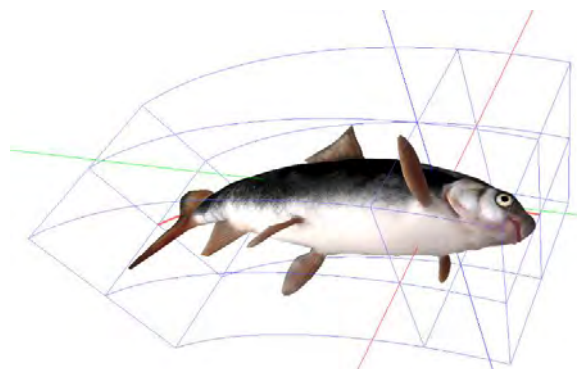


Рис. 4. Результат работы алгоритма деформации статической трехмерной модели рыбы

Алгоритм основан на деформации статической трехмерной модели методом трансформации текущей плоскости в поверхность, заданной функцией трансформации, параметром которой является степень изгиба [5].

3. Результаты

На основе разработанной математической и имитационной модели авторами была создана и зарегистрирована в Роспатенте [6] программа для ЭВМ «Замкнутая система «УЗВ – гидробионт» (см. рис. 5). Ее назначение - имитация поведения гидробионтов в ограниченном пространстве

прямоугольного или цилиндрического типа с детализацией до особи в трехмерной области. Таким образом, программа для ЭВМ позволяет моделировать поведение рыбы как в бассейнах УЗВ, так и садках аквакультуры, установленных в море, в том числе одновременно с целью более удобного сопоставления результатов.

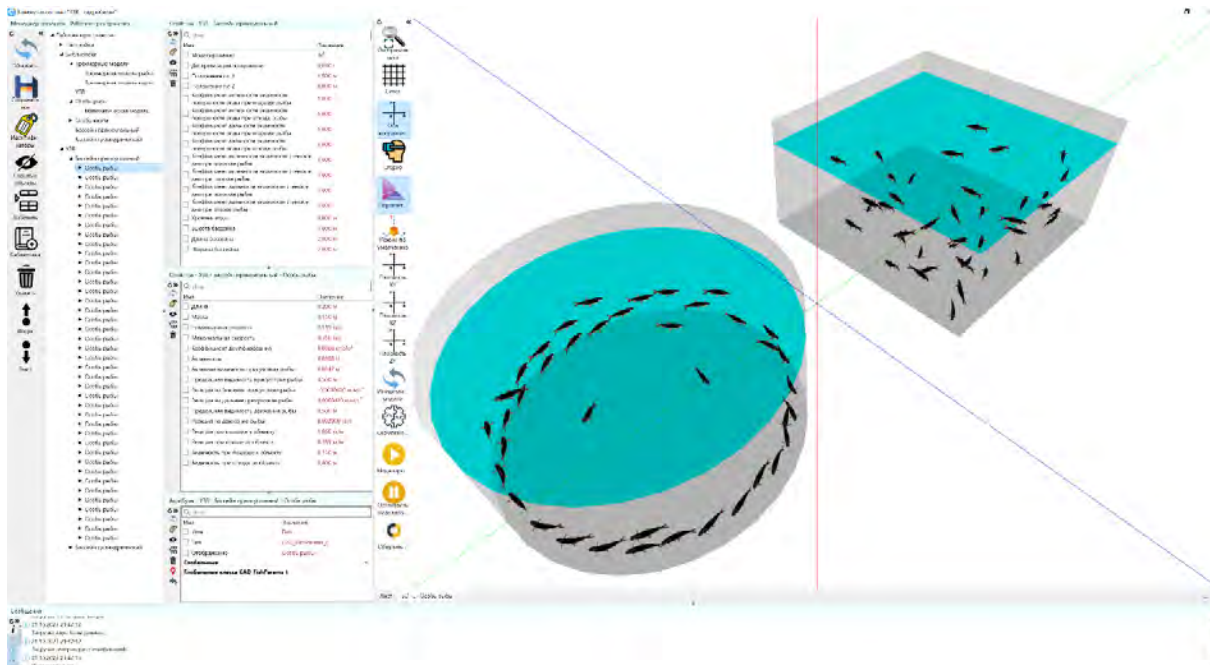


Рис. 5. Программа для ЭВМ «Замкнутая система «УЗВ – гидробионт»

Основные функции программы для ЭВМ: конструктор и компоновщик бассейнов с рыбой; редактор поведенческих характеристик каждой особи; симулятор реального времени; 3D – визуализатор с возможностью стереоскопического вывода. В программе предусмотрена загрузка и выгрузка проекта и результатов моделирования. Разработка программного продукта осуществлялась в среде визуального проектирования программного обеспечения Embarcadero RAD Studio на языке программирования C++ [7].

В программе для каждой особи и для бассейна отдельно задаются параметры. Результат моделирования в реальном времени отображается на экране либо на устройстве стереоскопического вывода (3D-телевизоре, стерео-очках, стереопроекторе и др.). Реализована поддержка устройства пространственного управления сценой при помощи рук Leap Motion [8].

В программе предусмотрена пополняемая библиотека рыб различного вида, бассейнов прямоугольной и цилиндрической формы, их трехмерных моделей. Работа с библиотеками и компоновка производится из менеджера проектов (см. рис. 6).

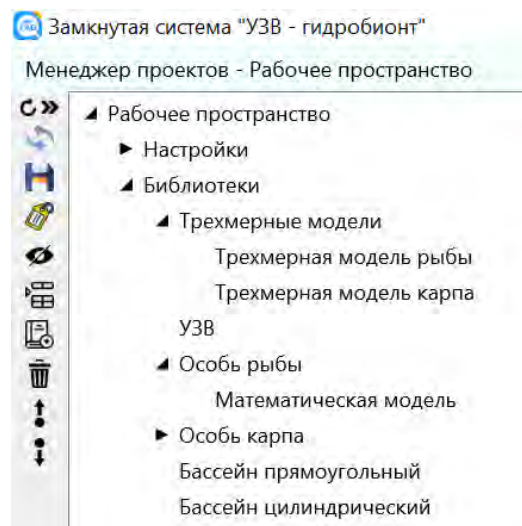


Рис. 6. Менеджер проектов

Параметры каждой особи и каждого бассейна задаются в редакторе их свойств (см. рис. 7-9).

Свойства - УЗВ - Бассейн цилиндрический - Особь рыбы

Имя	Значение
☐ Длина	0,200 м
☐ Масса	0,150 кг
☐ Номинальная скорость	0,119 м/с
☐ Максимальная скорость	0,350 м/с
☐ Коэффициент демпфирования	0,0366 кг-с/м ²
☐ Активность	0,0100 Н
☐ Активная видимость присутствия рыбы	0,0847 м
☐ Предельная видимость присутствия рыбы	0,500 м
☐ Реакция на ближнее присутствие рыбы	-0,0000620 кг-м/с ²
☐ Реакция на дальнее присутствие рыбы	0,0000420 кг-м/с ²
☐ Предельная видимость движения рыбы	0,500 м
☐ Реакция на движение рыбы	0,002000 кг/с
☐ Реакция при подходе к объекту	1,060 кг/м
☐ Реакция при отходе от объекта	0,319 кг/м
☐ Видимость при подходе к объекту	0,150 м
☐ Видимость при отходе от объекта	0,400 м

Рис. 7. Редактор свойств особи

Свойства - УЗВ - Бассейн прямоугольный

Имя	Значение
☐ Моделирование	☒
☐ Дискретизация по времени	0,010 с
☐ Положение по X	1,500 м
☐ Положение по Z	0,000 м
☐ Коэффициент активности видимости поверхности воды при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент активности видимости поверхности воды при отходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости поверхности воды при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости поверхности воды при отходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент активности видимости стенок и дна при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент активности видимости стенок и дна при отходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости стенок и дна при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости стенок и дна при отходе рыбы	1,000
☐ Уровень воды	0,800 м
☐ Высота бассейна	1,000 м
☐ Длина бассейна	2,000 м
☐ Ширина бассейна	2,000 м

Рис. 8. Редактор свойств прямоугольного бассейна

Свойства - УЗВ - Бассейн цилиндрический

Имя	Значение
☐ Моделирование	☒
☐ Дискретизация по времени	0,010 с
☐ Положение по X	-1,500 м
☐ Положение по Z	0,000 м
☐ Коэффициент активности видимости поверхности воды при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент активности видимости поверхности воды при отходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости поверхности воды при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости поверхности воды при отходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент активности видимости стенок и дна при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент активности видимости стенок и дна при отходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости стенок и дна при подходе рыбы	1,000
☐ Коэффициент дальности видимости стенок и дна при отходе рыбы	1,000
☐ Уровень воды	0,800 м
☐ Высота бассейна	1,000 м
☐ Диаметр	2,000 м

Рис. 9. Редактор свойств цилиндрического бассейна

На рис. 10 показан результат трехмерной визуализации особей в цилиндрическом садке аквакультуры.



Рис. 10. 3D - визуализация

Значения параметров особи, бассейна либо любого другого объекта можно установить как константными, так и зависимыми. Для привязки к параметру зависимости предназначен редактор атрибутов свойства. В нем можно определить математическое выражение для расчета параметра.

Для проверки адекватности разработанных математических и имитационных моделей, описывающих движение рыб в ограниченном пространстве, используется имеющаяся в распоряжении авторов статьи мобильная рыбоводная лаборатория (МРЛ), предоставленная ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (см. рис. 11). В ее бассейнах осуществляется цифровая видеосъемка (см. рис. 12) жизнедеятельности рыбы на примере взрослых особей (см. рис. 13) и сеголеток (см. рис. 14) карпа для последующего анализа траекторий движения особей с применением технологий машинного зрения.



Рис. 11. Мобильная рыбоводная лаборатория (МРЛ)



Рис. 12. Видеосъемка в УЗВ

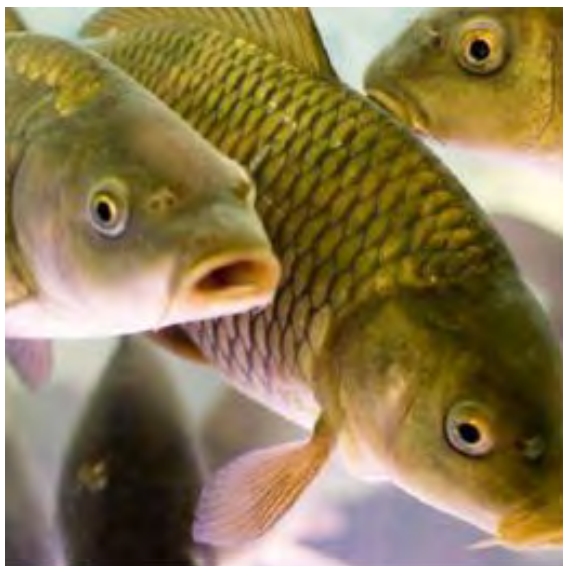


Рис. 13. Взрослая особь карпа



Рис. 14. Сеголетки карпа

Для измерения производительности предложенного алгоритма было создано два независимых бассейна цилиндрического и прямоугольного типа (см. рис. 5). В каждый бассейн было помещено 40 особей. Моделирование производилось на персональном компьютере, характеристики которого указаны в таблице.

Таблица

Характеристики экспериментальной ПЭВМ

N/N	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	8-и ядерный AMD Ryzen 7 2700 3,2 ГГц
1.2	Видеоадаптер	AMD Radeon HD 7850, 1 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 16 Гб
1.4	Диск	SSD, емкостью 1 Тб
2	Монитор	Диагональ 28 дюймов, разрешение 3840 x 2160
3	Устройства 3D-ввода	Датчик движения рук Leap Motion 3D
4	Устройство объемной стереоскопической визуализации	3D-телевизор с LCD-экраном поляризационного типа, диагональ 42 дюйма, разрешение 1920 x 1080

В процессе моделирования в режиме реального времени было определено минимальное время шага работы алгоритма, которое составило 0.01 с. При этом построение и перерисовка всей сцены происходили после каждого шага. Таким образом была достигнута частота обновления кадров - 100 Гц, что более чем достаточно для комфортного визуального восприятия.

Заключение

Разработанные математическая и имитационная модели, и программа для ЭВМ способны моделировать поведение рыбы в ограниченном пространстве с детализацией до особи. Каждой особи сопоставляется набор параметров, определяющих ее поведение и индивидуальность. Параметры особи могут быть определены экспериментально и быть постоянными в процессе моделирования, а могут быть зависимы от условий выращивания и других факторов. Зависимость может задаваться как математически, так и при помощи обученной искусственной нейронной сети.

Данные о траекториях движения с временными маркерами, полученные с использованием технологий машинного зрения, будут сопоставлены с данными математической модели для последующего вычисления ее параметров методом последовательных приближений (решение обратной математической задачи) и с применением искусственной нейронной сети. Полученные усредненные по группам рыб (взрослых особей и сеголеток) параметры будут использованы для верификации теории мультифизического подобия гидробионтов [9], разработанной авторами статьи в ходе проведения настоящего исследования.

Разработка и отладка алгоритма машинного зрения будет вестись на разработанной имитационной модели поведения рыб в УЗВ (захват видео), а его апробация – на МРЛ при помощи видеосъемки.

Научная новизна исследования заключается в применении междисциплинарного подхода для достижения поставленной цели; в оптимизации алгоритмов имитационного моделирования для работы на современных гетерогенных вычислительных системах широкого применения, в состав которых входит как центральный, так и графический процессоры, что дает возможность моделирования в реальном времени на персональном компьютере достаточно большое количество особей; попытке совмещения технологий

математического моделирования, машинного зрения и искусственного интеллекта, виртуальной и дополненной реальности.

Архитектура программы для ЭВМ является модульной с расширяемым функционалом. В процессе выполнения научного исследования в программу будет добавляться поддержка имитации различных технических средств аквакультуры, системы машинного зрения, дополненной реальности, сбора статистики, средств автоматизации технологических процессов.

Разработанное программное обеспечение может применяться для научных исследований, проектирования и эксплуатации рыбоводных ферм, систем виртуальной реальности, тренажерных комплексов, в процессе обучения.

Литература

1. Sturrock H., Newton R., Paffrath S., Bostock J., Muir J., Young J., Immink A., Dickson M. Prospective Analysis of the Aquaculture Sector in the EU. Part 2: Characterisation of emerging aquaculture systems. Institute for Prospective Technological Studies, 2008, 152 p. ISBN 978-92-79-09442-2. doi:10.2791/31843.
2. Nedostup A. A., Razhev A. O., Bagrova A. A., Vasiliev D. E. Theory of multiphysical similarity of hydrobionts. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. 2023;3:19-27 (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-3-19-27>.
3. Недоступ А.А. Математическое моделирование поведенческих характеристик стаи рыб при облове разноглубинным тралом / А. А. Недоступ, Б. А. Альтшуль, А. О. Ражев, С. В. Дятченко, О. М. Бедарева, А. А. Багрова // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4(46). Т.4. С. 181–185.
4. Tolman, R. C. (1938). The Principles of Statistical Mechanics. Oxford: Clarendon Press. Reissued (1979) New York: Dover ISBN 0-486-63896-0.
5. Ражев А.О., Недоступ А.А. Визуализация гидробионта в процессе движения с учетом изменения его формы // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 9. ISSN 2712-8873. С. 92-97. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_9_92.
6. Ражев А.О., Недоступ А.А. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2023682021 Российская Федерация. Замкнутая система «УЗВ – гидробионт» / заявитель и правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория цифровых технологий». – заявл. 2023681176 15.10.2023; опубл. 20.10.2023. – 1 с.
7. Embarcadero RAD Studio. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/rad-studio> (дата обращения 16.11.2023).
8. Leap Motion. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ultraleap.com> (дата обращения 16.11.2023).
9. Недоступ А.А., Ражев А.О. Постановка задач разработки математических и имитационных моделей, описывающих механику гидробионтов в УЗВ с учетом различных мультифизических факторов // Сборник научных трудов XVI Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса» (Конференция «ИнтерАгро 2023»). ISBN 978-5-6049569-8-4. ДГТУ – Ростов-на-Дону: ДГТУ-Принт, 2023. – С. 212-215. DOI: 10.23947/interagro.2023.212-215.

References

1. Sturrock H., Newton R., Paffrath S., Bostock J., Muir J., Young J., Immink A., Dickson M. Prospective Analysis of the Aquaculture Sector in the EU. Part 2: Characterisation of emerging aquaculture systems. Institute for Prospective Technological Studies, 2008, 152 p. ISBN 978-92-79-09442-2. doi:10.2791/31843.
2. Nedostup A. A., Razhev A. O., Bagrova A. A., Vasiliev D. E. Theory of multiphysical similarity of hydrobionts. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. 2023;3:19-27 (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-3-19-27>.
3. Nedostup A.A., Al'tshul' B. A., Razhev A.O., Djatchenko S.V., Bedareva O.M., Bagrova A.A. Matematicheskoe modelirovanie povedencheskih harakteristik stai ryb pri oblove raznoglubinnyy tralom [Mathematical modeling of behavioral characteristics of a flock of fish when fishing with a midwater trawl], Morskie intellektual'nye tehnologii, 2019, No. 4(46), V. 4, pp. 181–185.
4. Tolman, R. C. (1938). The Principles of Statistical Mechanics. Oxford: Clarendon Press. Reissued (1979) New York: Dover ISBN 0-486-63896-0.
5. Razhev A.O., Nedostup A.A. Vizualizacija gidrobionta v processe dvizhenija s uchetom izmenenija ego formy [Visualization of a hydrobiont in the process of movement, taking into account changes in its shape], Matematicheskie metody v tehnologijah i tehnike, 2023, No. 9, pp. 92-97. ISSN 2712-8873. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_9_92.
6. Razhev A.O., Nedostup A.A. Svid. o gos. registracii programmy dlja JeVM 2023682021 Rossijskaja Federacija. Zamknutaja sistema "UZV – gidrobiont" [Closed system "RAS – hydrobiont"], zajavitel' i pravoobladatel' Obshestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "Laboratorija cifrovych tehnologij" [DigiTech Laboratory, LLC]. – zajavl. 2023681176 15.10.2023; opubl. 20.10.2023. – 1 p.

7. Embarcadero RAD Studio. [Electronic resource]. URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/rad-studio> (access date: 11.16.2023).
8. Leap Motion. [Electronic resource]: URL: <https://www.ultraleap.com> (access date: 11.16.2023).
9. Nedostup A.A., Razhev A.O. Postanovka zadach razrabotki matematicheskikh i imitacionnykh modelej, opisyvajushhih mehaniku gidrobiontov v UZV s uchetom razlichnykh mul'tifizicheskikh faktorov [Formulation of tasks for the development of mathematical and simulation models describing the mechanics of hydrobionts in RAS taking into account various multiphysical factors], Sbornik nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Sostojanie i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa" (Konferencija "InterAgro 2023"), DGTU – Rostov-na-Donu: DGTU-Print, 2023, pp. 212-215. ISBN 978-5-6049569-8-4. doi: 10.23947/interagro.2023.212-215.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ражев Алексей Олегович, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Лаборатория цифровых технологий», 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: root@digitechlab.ru

Aleksey O. Razhev, Ph.D. (Eng), General Director, DigiTech Laboratory, LLC, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: root@digitechlab.ru

Недоступ Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.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

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 681.518.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.034>

Моделирование и оценка надежности канала связи береговых Центров дистанционного управления морскими автономными надводными судами

Старжинская Н.В.¹ karbovets_n@mail.ru, Чернова А.И.¹ ruzhay_ann@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы обеспечения эксплуатационной надежности системы передачи информации между Центрами дистанционного управления (ЦДУ), а также ЦДУ и другими береговыми службами в условиях внедрения концепции a-Navigation. Рассмотрены различные конфигурации оборудования радиорелейной связи и предложена математическая модель оценки надежности. Разработаны графы состояний для оценки надежности и рассчитаны коэффициенты готовности рассматриваемых конфигураций линии передачи информации. Показано, что конфигурация радиорелейного оборудования по схеме с двумя частотными стволами более эффективна для применения при организации линии связи Центра дистанционного управления, поскольку увеличивает пропускную способность каналов в два раза. Кроме того, применение конфигурации радиорелейного оборудования по схеме «2+1» обеспечивает высокую пропускную способность каналов связи, а также горячее резервирование оборудования, для замены отказавших элементов, что является важнейшим аспектом для обеспечения непрерывной работы Центра дистанционного управления и обеспечения непрерывной связи с другими ЦДУ и береговыми службами.

Ключевые слова: радиорелейное оборудование, линия передачи информации, морское автономное надводное судно, a-Navigation, эксплуатационная надежность, марковская модель, коэффициент готовности.

Для цитирования: Старжинская Н.В., Чернова А.И. Моделирование и оценка надежности канала связи береговых Центров дистанционного управления морскими автономными надводными судами, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 285—291. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.034

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.034>

Modeling and assessment of communication channel reliability of the Remote Control Center for Maritime Autonomous Surface Ships

Natalya V. Starzhinskaya¹ karbovets_n@mail.ru, Anna I. Chernova¹ ruzhay_ann@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. The article deals with the issues of ensuring operational reliability of the information transmission system between Remote Control Centers (RCC), as well as RCC and other coastal services under the conditions of implementing the a-Navigation concept. Different configurations of radio relay communication equipment are considered and a mathematical model of reliability assessment is proposed. State graphs for reliability estimation have been developed and availability coefficients of the considered configurations of information transmission line have been calculated. It is shown that the configuration of radio relay equipment according to the scheme with two frequency trunks is more effective for use in the organization of the communication line of the Remote Control Center, because it increases the channel capacity in two times. Besides, application of the radio-relay equipment configuration according to the scheme «2+1» provides high carrying capacity of communication channels, as well as hot redundancy of equipment, for replacement of failed elements, which is the most important aspect for providing continuous operation of the Remote Control Center and providing continuous communication with other CDC and coastal services.

Key words: radio relay equipment, data transmission line, marine autonomous surface ship, a-Navigation, operational reliability, Markov model, availability factor.

For citation: Natalya V. Starzhinskaya, Anna I. Chernova, Modeling and assessment of communication channel reliability of the Remote Control Center for Maritime Autonomous Surface Ships, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 285—291. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.034

Введение

Повышение автоматизации судов, развитие технологий автономного судовождения, а также береговой инфраструктуры систем связи и системы ситуационной осведомленности является одним из перспективных направлений в настоящее время [1,

2]. Для обеспечения безопасности автономного судовождения, а также эффективного и непрерывного контроля за движением МАНС, должны быть созданы надёжные системы связи, управления, навигационные, информационные системы, а также береговые Центры дистанционного управления с соответствующей инфраструктурой,

входящие в систему обеспечения ситуационной осведомленности [3]. Состав и функциональные возможности средств радиосвязи и обмена данными Центров дистанционного управления должны обеспечивать радиосвязь и обмен данными между ЦДУ, а также ЦДУ с береговыми службами, в частности с Системой управления движением судов (СУДС), спасательным координационным центром (СКЦ), судовладельцем и внешним капитаном МАНС, как непосредственно, так и через ЦДУ в течение всего рейса МАНС с качеством, обеспечивающим его безопасность и эффективность [4].

Система передачи данных между ЦДУ, ЦДУ и береговыми службами может быть построена на базе радиорелейных станций (РРС), которые устанавливаются на возвышенностях, а также в условиях сложного рельефа местности. Высокая пропускная способность каналов связи РРЛ позволяет заменять кабельные линии и уступает по пропускной способности только волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Современные цифровые радиорелейные линии (ЦРРЛ) с помощью технических и программных средств позволяют организовать высокоскоростные каналы связи, поддерживающие передачу символьной, графической, звуковой, анимационной и видеoinформации в режиме реального времени [5].

Для обеспечения непрерывного обмена данными между системами ЦДУ должна быть обеспечена высокая надежность входящего в состав оборудования. Уровень надежности должен быть не ниже требований к уровню надежности к аналогичному оборудованию СУДС высшей категории [4], т.е. должен соответствовать коэффициенту готовности 0,9999, а для некоторых систем и 0,99999 [6].

Постановка задачи

Цифровые РРС ЦДУ в одном частотном стволе методом временного мультиплексирования сигналов обеспечивают передачу данных:

- радиолокационного изображения БРЛС;
- изображения видеокамер;
- гидро- и метеостанций;
- локальных сетей ЭВМ;
- со входа/выхода модемов базовых станций АИС, базовых станций связи;
- телефонии;
- телеуправления, сигнализации и контроля оборудования.

Радиорелейные линии связи (РРЛ) ЦДУ расположены на побережье. Следовательно, на передаваемые радиосигналы существенное влияние оказывает подстилающая морская поверхность. Возникает, так называемое, явление двухлучевости (прямой и отраженный от водной поверхности сигналы). Попадание в приемную антенну прямой и отраженных волн приводит к интерференции и сильным замираниям сигнала в точке приема. Таким образом, существенно ухудшаются качественные характеристики каналов связи.

Состояние радиорелейной линии, при котором она не может обеспечить требуемое качество сигналов для передачи информации называется неготовностью. Для повышения устойчивости связи на пролете РРЛ, а также обеспечения эксплуатационной надежности оборудования и

уменьшения коэффициента неготовности интервалов распространения радиоволн применяют различные виды резервирования РРЛ, а также схемы разнесенного приема сигналов.

Конфигурации радиорелейного оборудования имеют следующее обозначение: «N+M», где N – общее число стволов РРЛ, а M – число резервированных стволов РРЛ. Кроме того, к количеству стволов добавляют аббревиатуру HSB (Hot StandBy; горячий резерв), SD (Space Diversity; пространственное разнесение) или FD (Frequency Diversity; частотное разнесение), обозначающую метод резервирования стволов РРЛ [7-9].

В целях борьбы с замираниями один и тот же сигнал передается с помощью двух разнесенных по высоте антенн. Так, например, в настоящее время, в СУДС, используется система «1+1» с пространственным разделением сигналов [10]. В такой системе замирания в обоих каналах некоррелированы. В точке приема сигналы на выходе каналов складываются или производится выбор одного из сигналов. При этом замирания уменьшаются в несколько раз. Кроме того, в системе с конфигурацией «1+1» один из каналов используется, как резервный. В сложных условиях распространения радиоволн, оба ствола могут быть использованы для организации разнесенного приема, существенно улучшающего устойчивость работы системы связи.

Для увеличения пропускной способности используются системы «N+0», в частности, «2+0». В данном случае второй радиоствол получается за счет использования других частот, которые не создают помеху для первого. С целью повышения надежности такой системы следует использовать резервирование, например, по схеме «2+1».

В связи с увеличением потока и объемов данных для передачи в условиях внедрения а-Навигации возникает задача увеличения пропускной способности каналов связи РРЛ, а также обеспечения их эксплуатационной надежности. В связи с этим рассмотрим далее различные конфигурации РРЛ с учетом их резервирования, увеличения емкости и стоимости оборудования.

Математическая модель оценки надежности линии передачи информации береговых Центров дистанционного управления МАНС

С учетом сказанного выше произведем, с помощью марковской модели, оценку надежности линии передачи информации для различных конфигураций РРЛ [11]. В первую очередь, рассмотрим используемые в настоящее время конфигурации РРЛ, в частности РРЛ СУДС. Как уже отмечалось ранее оборудование рассматриваемой радиорелейной станции является непрерывно работающей двухканальной линией передачи информации. Используется система «1+1» с пространственным разделением каналов для уменьшения замираний. Кроме того, в системе «1+1» один из каналов может использоваться как резервный. С учетом этого составим граф состояний канала связи (рис. 1).

В соответствии с приведенным на рис. 1 графом система может находиться в следующих состояниях:

- состояние «0» – работоспособное состояние (оба канала связи исправны);

- состояние «1» – отказал один из каналов и происходит обнаружение отказа с интенсивностью γ ;
- состояние «2» – отказал один из каналов, отказ обнаружен и происходит восстановление с интенсивностью μ_1 , либо произошел отказ второго канала;
- состояние «3» – отказали оба канала связи (состояние отказа) и происходит восстановление с интенсивностью $(\mu_1 + \mu_2)$.

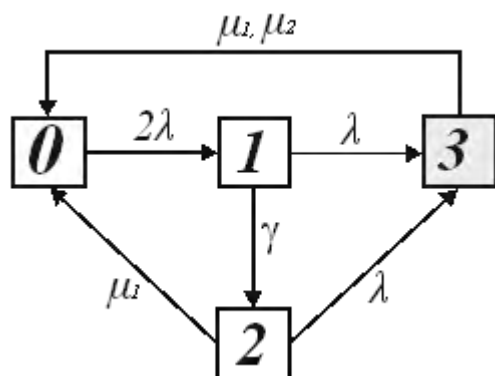


Рис. 1 – Граф состояний двухканальной линии передачи информации по схеме «1+1» (Hot StandBy)

Система дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + \mu_1 P_2(t) + (\mu_1 + \mu_2) P_3(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - \gamma P_1(t) - \lambda P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -\mu_1 P_2(t) + \gamma P_1(t) - \lambda P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda P_1(t) + \lambda P_2(t) - (\mu_1 + \mu_2) P_3(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов радиорелейного оборудования;

γ – интенсивность обнаружения отказа;

μ_1 – интенсивность восстановления оборудования одного канала;

μ_2 – интенсивность восстановления оборудования второго канала.

Решим составленную систему дифференциальных уравнений (1) с помощью математического редактора MathCAD и найдем коэффициент готовности для двухканальной линии передачи информации (по схеме «1+1»).

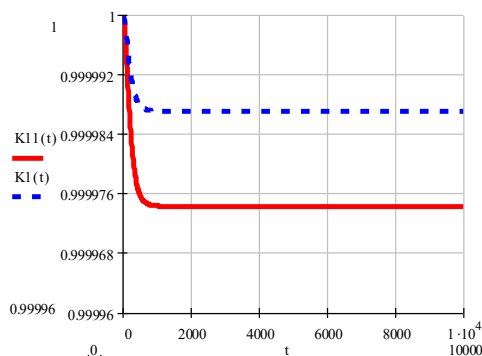


Рис.2. Зависимость коэффициента готовности оборудования линии передачи информации по схеме «1+1» от времени ($K_{11}(t)$ – при «горячем» резервировании; $K_1(t)$ – при «холодном» резервировании)

Как уже отмечено выше, в условиях развития а-навигации существенно увеличится количество передаваемой информации, что, в свою очередь, потребует увеличения пропускной способности каналов связи [12]. В связи с этим, для обеспечения связи между ЦДУ, а также ЦДУ и береговыми службами следует использовать другие конфигурации радиорелейного оборудования.

Для увеличения пропускной способности радиорелейной линии обычно используется конфигурация «2+0». Такая конфигурация представляет собой два частотных ствола РРЛ или стволы с разной поляризацией, работающие через одну антенну [9]. Второй радиоствол получается за счёт использования других частот, которые не создают помеху для первого. В этом случае отдельные физические каналы передачи данных в оборудовании РРЛ могут быть объединены в один логический канал. Суммарная пропускная способность при такой конфигурации РРЛ составляет 200% от пропускной способности пролета «1+1».

Проведем далее оценку надежности оборудования РРЛ при конфигурации «2+0». Граф состояний каналов связи «2+0» приведен на рис. 3.

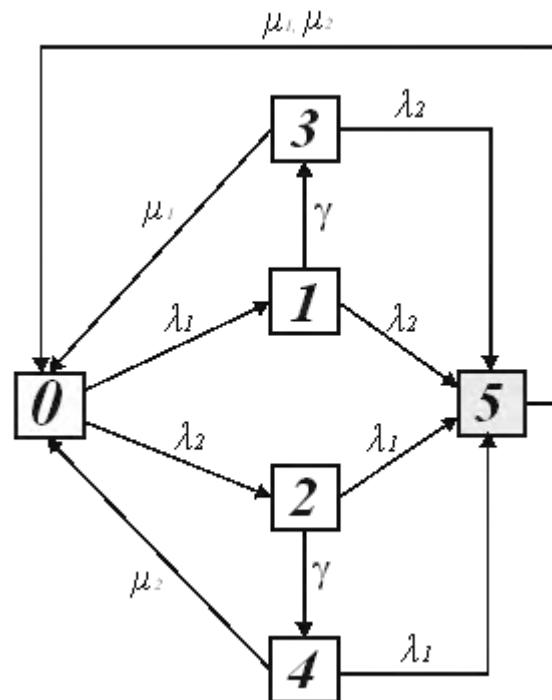


Рис. 3 – Граф состояний линии передачи информации по схеме «2+0»

В соответствии с приведенным на рис.3 графом система может находиться в следующих состояниях:

- состояние «0» – работоспособное состояние (оба канала исправны);
- состояние «1» – отказало оборудование канала №1, оборудование канала №2 работоспособно (пропускная способность уменьшилась в 2 раза); происходит обнаружение отказа с интенсивностью γ ;
- состояние «2» – отказало оборудование канала №2, оборудование канала №1 находится в работоспособном состоянии (пропускная способность уменьшилась в 2 раза); происходит обнаружение отказа с интенсивностью γ ;

– состояние «3» – отказало оборудование канала №1 (канал №2 работоспособен, пропускная способность меньше в 2 раза), отказ обнаружен и происходит восстановление с интенсивностью μ_1 , либо возник отказ канала №2 с интенсивностью λ_2 ;

– состояние «4» – отказало оборудование канала №2 (канал №1 работоспособен, пропускная способность меньше в 2 раза), отказ обнаружен и происходит восстановление с интенсивностью μ_2 , либо возник отказ канала №1 с интенсивностью λ_1 ;

– состояние «5» – отказали оба канала связи (состояние отказа) и происходит восстановление с интенсивностью $(\mu_1 + \mu_2)$.

Система дифференциальных уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_1 P_0(t) - \lambda_2 P_0(t) + \mu_1 P_3(t) + \mu_2 P_4(t) + (\mu_1 + \mu_2) P_5(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \gamma P_1(t) - \lambda_2 P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - \gamma P_2(t) - \lambda_1 P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \gamma P_1(t) - \lambda_2 P_3(t) - \mu_1 P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \gamma P_2(t) - \lambda_1 P_4(t) - \mu_2 P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) + \lambda_2 P_3(t) + \lambda_1 P_4(t) - (\mu_1 + \mu_2) P_5(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где λ_1 – интенсивность отказов радиорелейного оборудования канала №1;

λ_2 – интенсивность отказов радиорелейного оборудования канала №2;

γ – интенсивность обнаружения отказа;

μ_1 – интенсивность восстановления радиорелейного оборудования канала №1;

μ_2 – интенсивность восстановления радиорелейного оборудования канала №2.

Решим составленную систему дифференциальных уравнений (2) с помощью математического редактора MathCAD и найдем коэффициент готовности для конфигурации радиорелейного оборудования «2+0» (рис.4).

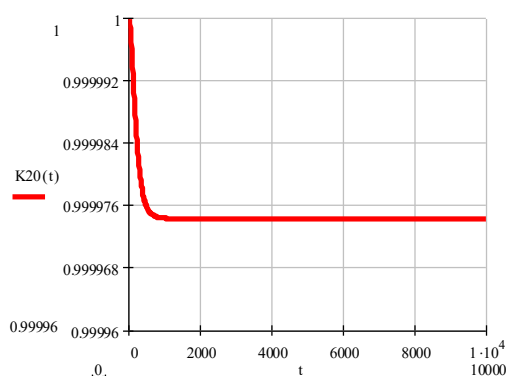


Рис.4. Зависимость коэффициента готовности оборудования линии передачи информации по схеме «2+0» от времени

Как показывают результаты расчетов, коэффициент готовности оборудования при конфигурации «2+0» достаточно высок и удовлетворяет требованиям к надежности подобных систем. Однако, следует отметить, что в случае отказа оборудования одного из каналов, система

продолжает работать, но пропускная способность снижается в два раза. Следовательно, целесообразно рассмотреть конфигурацию РРЛ с использованием резервного оборудования, находящегося в горячем (нагруженном) резерве. Следует отметить, что резервирование радиорелейного оборудования осуществляется путем дублирования всех или части функциональных блоков РРЛ. В случае отказа одного из блоков РРЛ, резервные блоки замещают неработоспособные.

Проведем далее оценку надежности оборудования РРЛ при конфигурации «2+1». Граф состояний каналов связи «2+1» приведен на рис. 5.

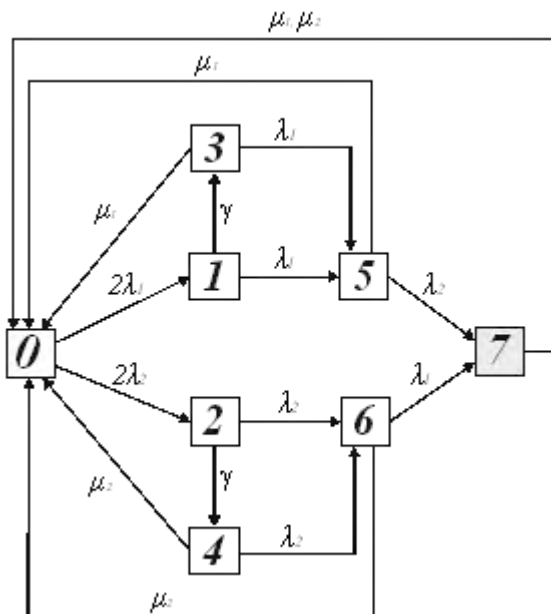


Рис. 5 – Граф состояний линии передачи информации по схеме «2+1»

В соответствии с приведенным на рис.5 графом система может находиться в следующих состояниях:

– состояние «0» – работоспособное состояние (все каналы, включая резервный, исправны);

– состояние «1» – отказало оборудование канала №1, работает резервный комплект оборудования; происходит обнаружение отказа с интенсивностью γ ;

– состояние «2» – отказало оборудование канала №2, работает резервный комплект оборудования и происходит обнаружение отказа с интенсивностью γ ;

– состояние «3» – отказало оборудование канала №1, работает резервный комплект оборудования, отказ обнаружен и происходит восстановление с интенсивностью μ_1 ; либо возник отказ второго (или резервного) канала с интенсивностью λ_2 ;

– состояние «4» – отказало оборудование канала №2, работает резервный комплект оборудования, отказ обнаружен и происходит восстановление с интенсивностью μ_2 , либо возник отказ первого (или резервного) канала с интенсивностью λ_1 ;

– состояние «5» – отказало оборудование резервного комплекта (канал №1) (канал №2 работоспособен, пропускная способность меньше в 2 раза); либо возник отказ оборудования канала №2 (или резервного) с интенсивностью λ_2 ;

– состояние «6» – отказало оборудование резервного комплекта (канал №2) (канал №1 работоспособен, пропускная способность меньше в 2

раза); либо возник отказ оборудования канала №1 (или резервного) с интенсивностью λ_1 ;

– состояние «7» – отказали оба канала (состояние отказа) и происходит восстановление оборудования.

Система дифференциальных уравнений (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda_1 P_0(t) - 2\lambda_2 P_0(t) + \mu_1 P_3(t) + \\ + \mu_2 P_4(t) + \mu_1 P_5(t) + \mu_2 P_6(t) + (\mu_1 + \mu_2) P_7(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda_1 P_0(t) - \gamma P_1(t) - \lambda_1 P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 2\lambda_2 P_0(t) - \gamma P_2(t) - \lambda_2 P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \gamma P_1(t) - \lambda_1 P_3(t) - \mu_1 P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \gamma P_2(t) - \lambda_2 P_4(t) - \mu_2 P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_1 P_1(t) + \lambda_1 P_3(t) - \lambda_2 P_5(t) - \mu_1 P_5(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_2 P_2(t) + \lambda_2 P_4(t) - \lambda_1 P_6(t) - \mu_2 P_6(t) \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_2 P_5(t) + \lambda_1 P_6(t) - (\mu_1 + \mu_2) P_7(t) \end{array} \right. \quad (3)$$

Решив составленную систему дифференциальных уравнений (3), определим коэффициент готовности для конфигурации радиорелейного оборудования «2+1» (рис.6).

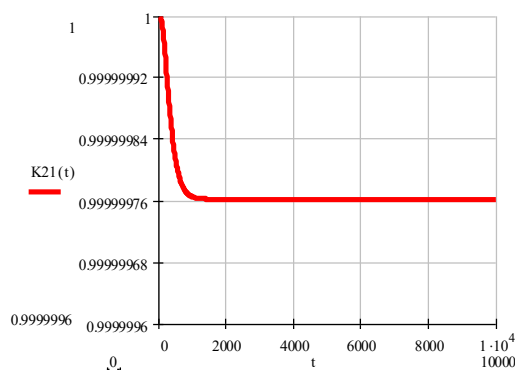


Рис.6. Зависимость коэффициента готовности оборудования линии передачи информации по схеме «2+1» от времени

Определим также наработку на отказ для каждой конфигурации радиорелейного оборудования, используя выражение для расчета коэффициента готовности:

$$K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_v} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + 1/\mu}, \quad (4)$$

где T_v – время восстановления.

Результаты проведенного анализа и сравнения различных конфигураций радиорелейного оборудования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение конфигураций радиорелейного оборудования

Конфигурация РРЛ	Коэффициент готовности, K(t)	Наработка до отказа, час	Пропускная способность
«1+1» (Hot StandBy)	0.9999743	$5.559 \cdot 10^6$	100%
«1+1» (Cold StandBy)	0.99998708	$1.106 \cdot 10^7$	100%
«2+0»	0.9999743	$5.559 \cdot 10^6$	200% от конфигурации «1+1»
«2+1»	0.999997614	$5.987 \cdot 10^8$	200% от конфигурации «1+1»

Результаты проведенного анализа показывают, что радиорелейная линия, построенная по конфигурации «1+1» имеет достаточную надежность, удовлетворяющую требованиям к надежности радиоэлектронного оборудования таких береговых систем, как СУДС, ГМССБ. Однако, как уже отмечено ранее, для обеспечения связи между ЦДУ, ЦДУ и МАНС, а также береговыми службами, необходимо обеспечение большей пропускной способности, чем, на сегодняшний день, требуется в СУДС. В связи с этим предпочтительнее являются конфигурации РРЛ по схеме «2+0» и «2+1». Следует отметить, что, учитывая отсутствие или частичное присутствие экипажа на борту МАНС, необходимо обеспечение непрерывной связи и передачи информации, т.к. необходим постоянный контроль обстановки, а, следовательно, повышаются требования к надежности радиоэлектронного оборудования.

Сравнивая результаты расчетов (таблица 1), видно, что конфигурация по схеме «2+0» позволяет

увеличить пропускную способность в два раза, при этом уровень надежности остается такой же, как и при конфигурации «1+1». В свою очередь при конфигурации «2+1» увеличивается пропускная способность пролета РРЛ и существенно возрастает надежность системы.

Заключение

Представленная математическая модель позволяет решить актуальную задачу выбора оптимальной комплектации оборудования при проектировании радиорелейной линии с учетом предъявляемых к нему требований по надежности и пропускной способности каналов.

Развитие предложенной математической модели оценки надежности позволит производить выбор конфигурации оборудования РРЛ с учетом требований, предъявляемых к организации каналов связи между ЦДУ, а также ЦДУ и береговыми службами.

Литература

1. Епихин А.И., Модина М.А. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 77-82.
2. Чернова, А.И., Старжинская Н.В. Моделирование влияния достоверности контроля технического состояния серверного комплекса морского автономного надводного судна на его эксплуатационную надежность // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1(60). – С. 342-349.
3. Чернова А.И., Старжинская Н.В. Многопараметрическая диагностика технического состояния пространственно-распределенных радиотехнических постов СУДС // Морские интеллектуальные технологии. Труды Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2021. № 2, том 4. С. 102–108.
4. НД № 2-030101-037. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). – СПб., Российский морской регистр судоходства.
5. Кан, В.С. Развитие комплекса береговых средств навигации и ГМССБ на Камчатке для информационного обеспечения рыбного промыслового флота: специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кан Владимир Синхович. – Санкт-Петербург, 2006. – 23 с.
6. Приказ от 23 июля 2015 г. №226 Об утверждении требований к радиолокационным системам управления движением судов, объектам инфраструктуры морского порта, необходимым для функционирования глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности, объектам и средствам автоматической информационной системы, службе контроля судоходства и управления судоходством.
7. Быховский, М.А. Основы проектирования цифровых радиорелейных линий связи: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» классификации (степени) «бакалавр» и квалификации (степени) «магистр» / М.А. Быховский, Ю.М. Кирик, В.И. Носов [и др.]. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2019. – 331 с.
8. ГОСТ Р 53363-2009 Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. – Москва, Стандартинформ, 2020.
9. Ключников, В.О. Методика создания быстро развертываемой сети связи на основе радиорелейных линий / В.О. Ключников // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 3(30).
10. Старжинская, Н.В., Чернова А.И. Логико-вероятностное моделирование надежности удаленного автоматизированного радиотехнического поста Системы управления движением судов // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 3-1(57). – С. 333-339.
11. Викторова, В.С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. – Изд. 2-е, испр. – Москва: URSS: Ленанд, сор. 2016. – 254 с.
12. Епихин А. И., Хекерт Е.В., Модина М.А. Анализ безопасности безэкипажных судов на основе структуры модели риска с использованием сети Байеса. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-4(52). С. 38-46.

References

1. Epikhin, A. I., Modina M. A. Problemy vnedreniya bezekipazhnykh sudov na osnove statisticheskikh issledovaniy avariynykh situatsiy i poter' sudov [Problems of implementation of unmanned ships based on statistical studies of accidents and losses of ships]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2021, № 3-1(53), S. 77-82.
2. Chernova, A.I., Starzhinskaja N.V. Modelirovanie vlijaniya dostovernosti kontrolja tehničeskogo sostojanija servernogo kompleksa morskogo avtonomnogo nadvodnogo sudna na ego jekspluatacionnuju nadezhnost' [Modeling the influence of the reliability of technical condition mass server complex monitoring on its operational reliability]. Morskie intellektual'nye tehnologii, 2023, № 2-1(60), S. 342-349.
3. Chernova A.I., Starzhinskaja N.V. Mnogoparametricheskaja diagnostika tehničeskogo sostojanija prostranstvenno-raspredeleennyh radiotehničeskikh postov SUDS [Multiparametric diagnostic of technical condition of spatially distributed radio technical posts of VTS]. Morskie intellektual'nye tehnologii. Trudy Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova, 2021, № 2, tom 4, S. 102-108.
4. ND № 2-030101-037. Polozhenija po klassifikacii morskikh avtonomnyh i distancionno upravljaemyh nadvodnyh sudov (MANS) [Provisions for the Classification of Maritime Autonomous and Remotely Operated Surface Ships (MASS)], SPb., Rossijskij morskij registr sudohodstva.
5. Kan, V.S. Razvitie kompleksa beregovykh sredstv navigacii i GMSSB na Kamchatke dlja informacionnogo obespechenija rybnopromyslovogo flota [Development of a complex of coastal navigation and GMDSS facilities in Kamchatka for information support of the fishing fleet]: special'nost' 05.12.14 «Radiolokacija i radionavigacija»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehničeskikh nauk, Kan Vladimir Sinhovich. Sankt-Peterburg, 2006, 23 s.
6. Prikaz ot 23 ijulja 2015 g. №226 Ob utverzhdenii trebovanij k radiolokacionnym sistemam upravlenija dvizheniem sudov, ob'ektam infrastruktury morskogo porta, neobhodimym dlja funkcionirovanija global'noj morskoy sistemy svjazi pri bedstvii i dlja obespechenija bezopasnosti, ob'ektam i sredstvam avtomaticheskoy informacionnoj sistemy, sluzhbe kontrolja sudohodstva i upravlenija sudohodstvom [On the approval of requirements for radar systems for the Vessel traffic system, seaport infrastructure facilities necessary for the operation of the Global Maritime Distress and Safety System, facilities and means of the automatic identification system, the navigation control and navigation management service].

7. Byhovskij, M.A. Osnovy proektirovaniya cifrovyyh radiorelejnykh linij svyazi [Fundamentals of design of digital radio relay communication lines]: uchebnoe posobie dlja studentov vysshix uchebnykh zavedenij, obuchajushhihsja po napravleniju podgotovki 210700 «Infokommunikacionnye tehnologii i sistemy svyazi» klassifikacii (stepeni) «bakalavr» i kvalifikacii (stepeni) «magistr», M.A. Byhovskij, Ju. M. Kirik, V.I. Nosov [i dr.]. Moskva: Gorjachaja linija, Telekom, 2019, 331 s.
8. GOST R 53363-2009 Cifrovye radiorelejnye linii. Pokazateli kachestva. Metody rascheta [Digital radio relay lines. Quality indicators. Calculation methods]. Moskva, Standartinform, 2020.
9. Kljuchnikov, V.O. Metodika sozdanija bystro razvertyvaemoj seti svyazi na osnove radiorelejnykh linij [Technique for a quickly deployed communication network creation based on radio relay lines], V.O. Kljuchnikov. Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii, 2020, T. 8, № 3(30).
10. Starzhinskaja, N.V., Chernova A.I. Logiko-verojatnostnoe modelirovanie nadezhnosti udalennogo avtomatizirovannogo radiotekhnicheskogo posta Sistemy upravlenija dvizheniem sudov [Logical-probabilistic modeling of reliability of a remote automated radio engineering post of a Vessel Traffic System]. Morskie intellektual'nye tehnologii, 2022 № 3-1(57), S. 333-339.
11. Viktorova, V.S. Modeli i metody rascheta nadezhnosti tehniceskikh sistem [Models and methods for calculating the reliability of technical systems], V.S. Viktorova, A.S. Stepanjanc. Izd. 2-e ispr. Moskva: URSS: Lenand, cop, 2016, 254 s.
12. Epikhin A. I., Khekert E. V., Modina M. A. Analiz bezopasnosti bezekipazhnykh sudov na osnove struktury modeli riska s ispol'zovaniem seti bayesa [Analysis of the safety of unmanned vessels based on the structure of the risk model using the Bayesian network]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2021, № 2-4(52), S. 38-46.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Старжинская Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: karbovets_n@mail.ru

Natalya V. Starzhinskaya, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: karbovets_n@mail.ru

Чернова Анна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и информационных технологий, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Anna I. Chernova, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics and Information Technology, Admiral Ushakov Maritime University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353918, Russian Federation, e-mail: ruzhay_ann@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 04.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 20.09.2023.

Научная статья

УДК 004.94:656.61.052

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.035>

Агентный подход к имитационному моделированию движения судна в различных условиях

Оськин Д.А.¹ osykinda@msun.ru, Бочарова В.В.² my_viktor@mail.ru, Осипов С.В.¹ Osipovv77@mail.ru¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Россия,²Владивостокский государственный университет, г. Владивосток, Россия,

Аннотация. Обеспечение безопасности судовождения является важной задачей для современной системы судоходства. Это связано, в первую очередь, с внедрением беспилотных судов и разработки алгоритмов их использования, в частности, прокладки траектории движения, коррекции траектории при взаимодействии с другими судами или различными препятствиями. Целью работы является разработка визуальной модели, которая позволит проверить алгоритмы движения и взаимодействия судов в различных навигационных условиях на надёжность и безопасность. Приводится обзор видов имитационного моделирования, а именно, динамических систем, системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования. Рассмотрены наиболее распространённые программные продукты для реализации задач имитационного моделирования: Arena, ExtendSim, AnyLogic, Automod, Promodel. На основании критериев функционирования систем имитационного моделирования проведен их сравнительный анализ и выполнен выбор среды моделирования AnyLogic для решения поставленной задачи. Приведен поэтапный алгоритм создания имитационной модели на основе агентного подхода. Реализованы популяции агентов «порты», «судно» и описана логика их поведения в виде автоматных реализаций. Привязка к географической локации выполнена совместно с инструментом ГИС (геоинформационная система). Рассмотрены возможные перспективы развития и модернизации созданной модели.

Ключевые слова: имитационная модель, динамическая система, системная динамика, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование, AnyLogic.

Для цитирования: Оськин Д.А., Бочарова В.В., Осипов С.В. Агентный подход к имитационному моделированию движения судна в различных условиях. 2023. № 4 часть 1, С. 292—297. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.035

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.035>

Agent approach to simulation of vessel motion in different conditions

Dmitry A. Oskin¹ osykinda@msun.ru, Viktoriya V. Bocharova² my_viktor@mail.ru,Sergey V. Osipov¹ Osipovv77@mail.ru¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation²Vladivostok State University Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Ensuring the safety of navigation is an important task for the modern shipping system. This is primarily due to the introduction of unmanned vessels and the development of algorithms for their use, in particular, laying the trajectory of movement, correcting the trajectory when interacting with other vessels or various obstacles. The aim of the work is to develop a visual model that will check the algorithms for the movement and interaction of ships in various navigation conditions for reliability and safety. An overview of the types of simulation modeling, namely, dynamic systems, system dynamics, discrete-event and agent-based modeling, is given. The most common software products for the implementation of simulation modeling tasks are considered: Arena, ExtendSim, AnyLogic, Automod, Promodel. Based on the criteria for the functioning of simulation systems, their comparative analysis was carried out and the choice of the AnyLogic modeling environment was made to solve the problem. A step-by-step algorithm for creating a simulation model based on the agent-based approach is presented. Populations of agents «ports», «ship» are implemented and the logic of their behavior is described in the form of automata implementations. Binding to a geographic location is performed in conjunction with a GIS tool (geographic information system). Possible prospects for the development and modernization of the created model are considered.

Keywords: simulation model, dynamic system, system dynamics, discrete-event modeling, agent-based modeling, AnyLogic.

For citation: Dmitry A. Oskin, Viktoriya V. Bocharova, Sergey V. Osipov, Agent approach to simulation of vessel motion in different conditions, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 292—297. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.035

Введение

Задача обеспечения безопасности судовождения является существенно важной для современной системы судоходства. Причины возникновения

аварийных ситуаций связаны с нарушениями Правил плавания, прокладной траектории движения судна вне заданной безопасной полосы, пренебрежением скоростным режимом движения, и др. Традиционные методы судовождения, как правило, сводятся к

прокладке маршрута и обеспечению перехода судна по заданному маршруту. Развитием современных систем судовождения является совершенствование существующих систем управления по курсу (авторулевых) и по траектории (систем вождения по маршруту), наделение таких систем элементами искусственного интеллекта. Также, в настоящее время идет развитие беспилотного (безэкипажного) судовождения и алгоритмов использования беспилотных судов, в частности, прокладки траектории движения, коррекции траектории при взаимодействии с другими судами или различными препятствиями и др. Отсюда вытекает цель работы: разработка визуальной модели, которая позволит проверять алгоритмы движения судов в различных погодных условиях на надёжность и безопасность [1].

Материал и методы исследования

В теории моделирования активно применяются методы имитационного моделирования (ИМ). В этом случае исследуемая система или объект заменяются моделью, которая с достаточной точностью описывает их поведение.

С использованием различных программных продуктов с этой моделью проводят имитационные эксперименты для получения информации об исследуемой системе. Таким образом, ИМ является логико-математическим описанием объекта, с помощью которого можно провести компьютерное исследование для проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.

На данный момент выделяют несколько видов ИМ:

- динамические системы;
- дискретно-событийное моделирование;
- системная динамика;
- агентное моделирование.

Динамические системы (систему управления механическими, мехатронными, робототехническими и др. объектами управления) описываются совокупностью дифференциальных (для непрерывных систем), разностных (для дискретных систем) и алгебраических уравнений. Также используется подход, связанный с использованием блок-схем (структурное моделирование).

Дискретно-событийное моделирование используется, когда динамику системы

представляется последовательностью операций, осуществляемыми над некими сущностями (entities - транзакты). Эти сущности обладают атрибутами, влияющими на процессы их обработки и накапливающими статистические данные. Дискретно-событийное моделирование имеет широкую сферу приложений: логистика, системы массового обслуживания, транспортные и производственные системы и процессы.

Системная динамика – это подход имитационного моделирования, своими методами и инструментами позволяющий понять структуру и динамику сложных систем. Также системная динамика – это метод моделирования, использующийся для создания точных компьютерных моделей сложных систем для дальнейшего использования с целью проектирования более эффективной организации и политики взаимоотношений с данной системой [2]. По сути, такой вид моделирования более всех других парадигм помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями.

Агентное моделирование - метод ИМ, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом [3]. Цель агентных моделей - получить представление о правилах поведения системы, исходя из предположений о взаимодействии этих объектов в системе.

В работе будет использовано агентное моделирование, так как этот подход позволит задавать морским судам различные виды поведения, а также наблюдать за автономной прокладкой маршрутов и взаимодействии судов при прохождении этих маршрутов.

Выбор средства моделирования

На рынке представлено множество программных продуктов для ИМ. Наиболее распространены следующие среды имитационного моделирования: Arena [5,6], ExtendSim [7], AnyLogic [3, 8, 9], Automod [10], Promodel [11]. У каждого из них есть свои специализации, преимущества и недостатки. Характеристики этих сред имитационного моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики наиболее распространенных сред ИМ [4]

Характеристика среды	Arena	ExtendSim	AnyLogic	Automod	Promodel
Специализированный язык	нет	ModL	Java	Встроенный язык	Встроенный язык
Парадигмы ИМ					
1. Динамическая система	-	-	+	-	-
2. Системная динамика	-	-	+	-	-
3. Дискретно-событийное моделирование			+		
4. Агентное моделирование	-	+	+	-	-
5. Комбинированный подход	-	+	+	-	-
Потоки случайных чисел	Неограниченное число				100 потоков
Стандартные теоретические распределения	12	18	29	7	20
Эмпирические распределения			+		

Независимые прогоны моделируемой системы	+				
Разработка сценариев	+				
Планирование статистических экспериментов	+				
Интерактивный отладчик	+				
Разработка интерфейса для пользователя модели	-	-	+	-	-
Наличие демоверсии	+				-

Среда имитационного моделирования AnyLogic имеет ряд преимуществ: в ней реализованы все подходы ИМ, обладает встроенным универсальным языком программирования Java, также, AnyLogic является одной из наиболее распространенных сред ИМ в России.

Разработка модели

Основная цель разрабатываемой модели – симуляция передвижения судов в изменяющейся навигационной обстановке для того, чтобы проверять и отлаживать алгоритмы движения беспилотных судов.

Планируемая модель будет представлена в виде морской навигационной карты, на которой будут отображены объекты, имитирующие движения судов. Этими имитациями будут управлять асинхронные агенты, параллельно выполняющие каждый свою задачу, а конкретно, проведение судна из точки А в точку Б кратчайшим безопасным маршрутом. Этот маршрут будет строиться на основании алгоритма, который будет задаваться агенту при его создании. На основании этого алгоритма и различных входных данных будет строиться маршрут. На карте планируется реализовать возможность менять погодные условия, такие как: температура, высота волн, осадки, атмосферное давление, что будут в свою очередь влиять на прокладку маршрута.

Разработка модели ведётся в программе AnyLogic 8 Personal Learning Edition. Далее будут описаны некоторые моменты разработанной модели.

В работе используются различные типы агентов из встроенной библиотеки «Агент» AnyLogic. Так же используется ГИС (геоинформационная система) карта из библиотеки «Разметка пространства». Оттуда же взят инструмент ГИС точки, которые хранятся в контейнере и нужны для создания отметок на карте.

На рисунке 1 представлен внешний вид модели в рабочей зоне AnyLogic. На нём можно увидеть используемые при создании модели инструменты. Конкретно, были использованы две популяции агентов, мировая карта, коллекция, которая хранит местоположение портов. Слева показаны все используемые в модели файлы, справа – панель свойств выбранного объекта. В центре отображается область, которая будет отображаться при работе модели. Со всех сторон от этой области могут располагаться всевозможные дополнительные элементы, которые могут отображаться на модели не сразу (например, различные агенты, которые будут генерироваться по мере работы модели), или вообще не будут отображаться (например, параметры и переменные).

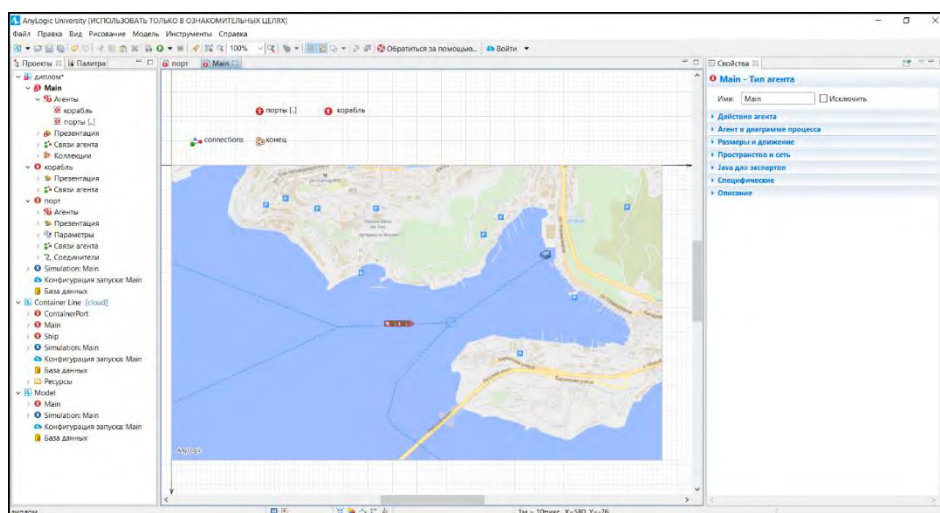


Рис. 1 – Модель в рабочей зоне AnyLogic

Популяция агентов «порты» отвечает за создание и размещение агентов типа «порт». Эти агенты отвечают за принятие и содержание агентов типа «судно». Так же они служат токами начала и конца маршрутов. Располагаются на карте они в различных

точках, которые хранятся в коллекции «конец». При запуске модели в каждой точке появляется свой агент. На рисунке 2 представлена логика работы агента типа «порт».

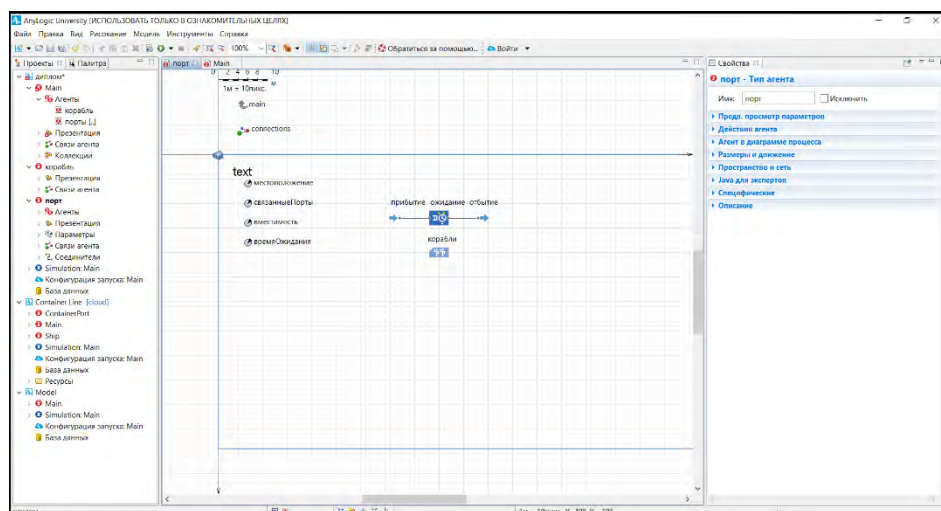


Рис. 2 – Описание логики работы «порта»

Работа агента типа «порт» заключается в принятии, отправлении и хранении агентов типа «судно». Справа видно четыре параметра, изменение которых приведёт к изменению работы модели (так проще менять различные характеристики агента, так как не нужно заходить в панель настроек). В центре находятся элементы из библиотеки «Моделирование процессов». Они и отвечают за логику работы агента, и что следует из названия, моделируют различные процессы, происходящие с агентом. В данном типе использованы контейнер для хранения агентов,

точка прихода агентов, очередь и точка выхода агентов. Агент имитирует работу порта. В него приходят агенты типа «судно», задерживаются на некоторое время, после чего отправляются в другой связанный порт. У агента есть несколько параметров: местоположение, связанные с ним другие агенты, вместимость доков и время задержки. Они используются для управления агентами типа «порт» и «судно».

На рисунке 3 представлена логика работы агента типа «судно».

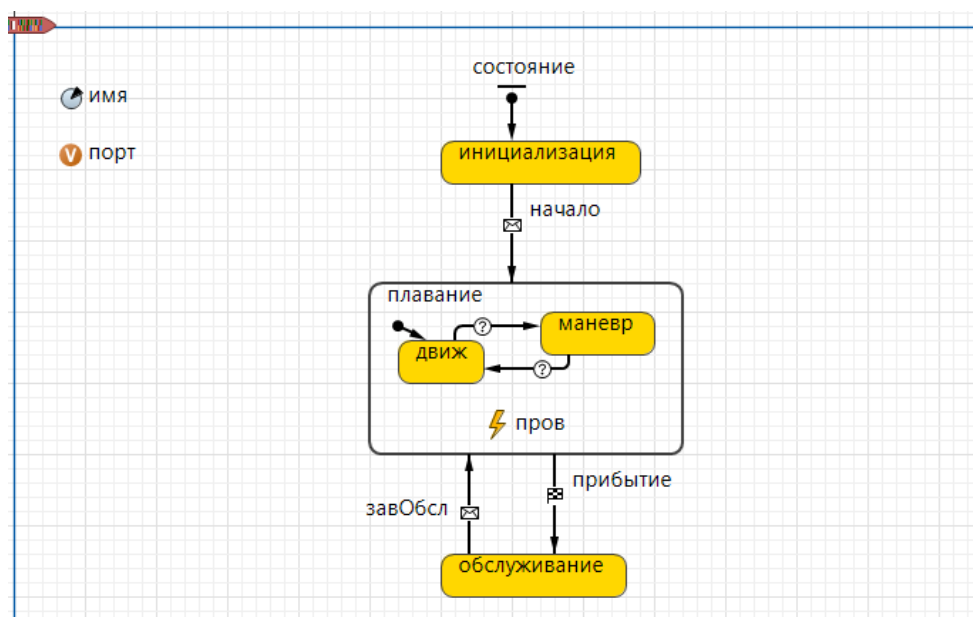


Рис. 3 – Описание логики работы судна

Судно движется по маршруту. Если сталкивается с препятствием, то начинает манёвр уклонения. У каждого агента есть своё имя. Детали манёвра уклонения задаются параметрами. По прибытию в порт встаёт на обслуживание, после чего отправляется по новому маршруту.

Далее планируется работа по улучшению модели, а именно:

1. Добавление различных физических параметров судам (вес, размер и т.д.) и отображение этих параметров в модели.
2. Интеграция в модель погодных карт на подобии онлайн-сервиса VentuSky. Моделирование влияния погодных условий на движения судов.
3. Более детальная проработка маршрутов и увеличение количества портов.

4. Добавление в модель рыболовецких судов и имитация их работы.

5. Добавление 3D объектов в модель. Отражение моделируемых сцен в 3D.

Заключение

В данной работе была выполнена поставленная задача, а именно создание модели, имитирующей движение судна в различных условиях. Для этого был использован агентный подход к имитационному моделированию.

В работе проводится изучение видов имитационного моделирования и выбор того, с помощью которого будет моделироваться текущая задача. Так же анализируются популярные среды моделирования с целью найти подходящую среду для реализации планируемой модели. Продемонстрировано описание разработанной модели. Так же была продемонстрирована её работа и приведены дальнейшие планы по разработке и модернизации модели.

Литература

1. МIRONENKO, A. A. Методология формализации навигационной обстановки и программирования движения судна [Текст] / А.А. МIRONENKO // Новороссийск: ГМУ им. Адм. Ф.Ф. Ушакова, 2016. – 162 с.
2. Sterman, J.D. (2000) Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin McGraw-Hill, Boston.
3. Борщев, А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А. В. Борщев // Exponenta Pro: Математика в приложениях. – 2004. – № 3-4. – С. 38-47. – EDN TAXZBL.
4. Журавлев С. С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем. Проблемы информатики, Номер: 3 (4) Год: 2009, стр. 47-53.
5. Arena, Rockwell Software. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.arenasimulation.com/>, свободный.
6. Обзор продуктов семейства Arena. [Электрон. ресурс] – режим доступа: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=66&vId=20>, свободный.
7. Imagine That, Inc. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.extendsim.com>, свободный.
8. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
9. Справка AnyLogic [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://help.anylogic.ru>, свободный.
10. Applied Materials Inc. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.automod.com/>, свободный.
11. Promodel Corporation. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.promodel.com/>, свободный.

References

1. Mironenko, A. A. Metodologiya formalizatsii navigatsionnoy obstanovki i programmirovaniya dvizheniya sudna [Methodology of formalization of the navigation environment and programming of the ship's movement] [Текст] / А.А. Mironenko // Novorossiysk: GMU im. Adm. F.F. Ushakova, 2016. – 162 s.
2. Sterman, J.D. (2000) Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin McGraw-Hill, Boston.
3. Borshchev, A. V. Prakticheskoe agentnoe modelirovanie i ego mesto v arsenale analitika [Practical agent-based modeling and its place in the analyst's arsenal] / A. V. Borshchev // Exponenta Pro: Matematika v prilozheniyakh. – 2004. – № 3-4. – S. 38-47. – EDN TAXZBL.
4. Zhuravlev S. S. Kratkiy obzor metodov i sredstv imitatsionnogo modelirovaniya proizvodstvennykh sistem. [Brief overview of methods and tools for simulation of production systems] Problemy informatiki, Nomer: 3 (4) God: 2009, str. 47-53.
5. Arena, Rockwell Software. [Elektronnyy resurs] – rezhim dostupa: <http://www.arenasimulation.com/>, svobodnyy.
6. Obzor produktov semeystva Arena. [Product overview of the Arena family] [Elektron. resurs] – rezhim dostupa: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=66&vId=20>, svobodnyy.
7. Imagine That, Inc. [Elektronnyy resurs] – rezhim dostupa: <http://www.extendsim.com>, svobodnyy.
8. Karpov Yu. G. Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5. [Simulation modeling of systems. Introduction to Simulation with AnyLogic 5.] SPb.: BKhV-Peterburg, 2009.
9. Spravka AnyLogic [AnyLogic Help] [Elektronnyy resurs] – rezhim dostupa: <https://help.anylogic.ru>, svobodnyy.
10. Applied Materials Inc. [Elektronnyy resurs] – rezhim dostupa: <http://www.automod.com/>, svobodnyy.
11. Promodel Corporation. [Elektronnyy resurs] – rezhim dostupa: <http://www.promodel.com/>, svobodnyy.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Оськин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной и микропроцессорной техники, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: osykinda@msun.ru

Бочарова Виктория Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: my_viktor@mail.ru

Осипов Сергей Владимирович, аспирант кафедры автоматических и информационных систем, Морской государственный университет, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: Osipovv77@mail.ru

Dmitry A. Oskin, Ph.D. (Eng), assistant professor, head department of electronic and microprocessor engineering, senior researcher of scientific laboratory of autonomous navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russia

Viktoriya V. Bocharova, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems, Vladivostok State University, 41 Gogolya st., Vladivostok 690014 Russia

Sergey V. Osipov, graduate student of automatic and information systems department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russia

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.06.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.09.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 10.10.2023.

Научная статья

УДК 629.5:681.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.036>

Нечеткий регулятор в системе компенсации влияния вертикальной качки судна на буксируемый подводный объект

Чупина К.В.¹ chupina.kv@dvfu.ru, Ханнанов А.М.¹ khannanov.am@dvfu.ru¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Изменение рабочих глубин привязных и буксируемых подводных аппаратов (ПА) выполняется с помощью установленного на судне спускоподъемного устройства (СПУ) или лебедки. Известно, что трос или кабель-трос в таких системах – это объект с распределёнными параметрами, поэтому частотные характеристики системы трос-ПА содержат бесконечное число резонансных максимумов. Несколько резонансных частот оказываются в диапазоне частот качки судна-носителя, вызванной морским волнением. При резонансе вертикальная качка ПА может в несколько раз превосходить качку точки крепления троса к судну-носителю, и проведение некоторых подводных работ становится невозможным или существенно затрудняется. Предложено производить компенсацию влияния качки с помощью СПУ с амортизирующим устройством (АУ) в виде подъёмно-опускной стрелы. Синтез и анализ линеаризованной системы автоматического управления (САУ) АУ выполнялся с использованием методов робастного управления. Такой подход обеспечил независимость параметров регулятора от степени волнения и рабочей длины троса. Для повышения эффективности работы нелинейной САУ предлагается осуществить коррекцию коэффициента усиления робастного регулятора методами нечеткой логики. Расчеты показали, что использование нечеткого регулятора позволяет уменьшить среднеквадратические перемещения точки подвеса троса и ПА в десятки раз по сравнению со случаем использования линейного регулятора.

Ключевые слова: подводный аппарат, морское волнение, спускоподъемное устройство, робастный регулятор, нечеткий регулятор

Для цитирования: Чупина К.В., Ханнанов А.М. Нечеткий регулятор в системе компенсации влияния качки судна на буксируемый подводный объект, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 298—304. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.036

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.036>

The fuzzy controller of the ship heave compensation system for the towed underwater vehicle

Kira V. Chupina¹ chupina.kv@dvfu.ru, Andrey M. Khannanov¹ khannanov.am@dvfu.ru¹Far Eastern Federal University, Russian Federation

Abstract. The control of towed and remotely operated vehicle's immersing depth is realized with the ship crane. The rope or cable is element with distributed parameters. The frequency response of the system "rope-vehicle" has infinity resonance peaks. There are several resonant frequencies in the range of sea waves. That's why vertical displacements of vehicle can exceed displacements of upper end of rope attached to vessel, and some underwater operations become impossible or very difficult. Heave motion compensation is offered to be realized with using of the ship winch with nodding boom as damping device. The synthesis and analysis of linearized automatic control system of damping device is designed by robust control methods. All parameters of controller don't depend on rope's length and sea force. To increase the efficiency of the nonlinear control system, it is offered to correct of robust controller's gain coefficient with fuzzy logic methods. The calculation has shown, that the using of fuzzy controller reduces vertical displacements of the upper rope's end and the vehicle in ten times in comparison with the robust controller.

Keywords: underwater vehicle, sea wave disturbance, ship crane, robust controller, fuzzy controller

For citation: Kira V. Chupina, Andrey M. Khannanov, The fuzzy controller of ship heave compensation system for towed underwater vehicle, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 298—304. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.036

Введение

Эффективность проведения подводных работ повышается при использовании привязных и буксируемых подводных аппаратов (ППА и БПА). Электрооборудование в таких системах производится по кабель-тросу с судна-носителя, а связь осуществляется с использованием оптоволоконной линии. Применение ППА и БПА позволяет увеличить рабочую глубину и время непрерывной работы [1-10].

Глубина погружения таких подводных аппаратов (ПА) меняется с помощью установленной на судне лебедки или спуско-подъемного устройства (СПУ), на барабан которого намотан трос или кабель-трос. Эта механическая связь представляет собой объект с распределёнными параметрами, главными из которых являются масса и упругость. Любые возмущения, приложенные к тросу, распространяются в нём со скоростью звука в виде продольных колебаний, многократно отражаясь при этом от концов троса. Частотные характеристики

системы трос-ПА имеют бесконечное число резонансных максимумов. Несколько резонансных частот попадают в диапазон частот качки судна-носителя, вызванной морским волнением. Чем длиннее трос и чем выше степень волнения, тем больше резонансных частот находится в рабочем диапазоне. При резонансе вертикальная качка ПА может в несколько раз превосходить качку точки крепления троса к судну-носителю, и проведение некоторых подводных работ становится невозможным или существенно затрудняется: взмучиваются осадки, становятся возможны удары ПА о дно, крайне затруднительным становится захват предметов, расположенных на дне, а также манипуляции с ними или с их частями. Обладающий упругостью трос существенно влияет на поведение глубоководного комплекса при отработке управляющих сигналов по изменению глубины погружения ПА, воздействуя на скорость СПУ [1-3, 5-7].

Как показали расчеты [1-3, 12, 14, 15], вертикальные перемещения ПА, вызванные качкой судна при стоянке судна лагом к волнению, становятся больше, чем перемещения точки подвеса троса. Поэтому для обеспечения надежной работы глубоководного комплекса судовое СПУ должно не только производить подъем/опускание ПА на заданную глубину, но и выполнять функцию компенсатора качки [1-10].

Оценка влияния нелинейностей при движении буксируемого ПА на поведение САУ СПУ

Современные СПУ дают возможность работать в условиях морского волнения на больших глубинах, эффективно компенсируя вертикальные перемещения судна-носителя. Но при этом или очень быстро расходуется ресурс кабель-троса, или усложняется конструкция ПА. Технические решения по компенсации воздействия качки судна-носителя на ПА основаны на амортизирующих свойствах электроприводов лебёдок, выполняющих постоянное травление или выбирание троса при стабилизации глубины ПА [1, 2, 5, 7-11].

В [4, 10] повышение эффективности использования ПА предлагается производить, используя судовое СПУ с амортизирующим устройством (АУ) в виде подъёмно-опускной стрелы. Этот способ позволяет снизить массогабаритные показатели как ПА, так и элементов СПУ. Размещение амортизирующего устройства на судне упрощает электроснабжение устройства, позволяет уменьшить массу и габариты ПА и подъёмной лебёдки, а также поперечное сечение и массу кабель-троса, мощность привода подъёмной лебёдки. Подвижный элемент амортизирующего устройства, выполненный в виде подъёмно-опускной стрелы, позволяет существенно снизить износ кабель-троса.

Метод расчета параметров регулятора амортизирующего устройства, параметры которого не зависят от степени волнения и рабочей длины троса, предложен в [12]. Структура предложенного регулятора также позволяет обеспечить интегральное регулирование, что улучшает адаптацию САУ к медленным воздействиям, таким, как течения, и к изменениям веса ПА.

В [12, 13] эффективность работы САУ амортизирующим устройством оценивалась с использованием теории робастного управления. Производилась оценка показателей качества функционирования как структурировано, так и неструктурированно возмущенной САУ. За структурированное возмущение принималось изменение параметров троса и ПА, за неструктурированное - влияние троса как элемента с распределенными параметрами. САУ при этом рассматривалась как линеаризованная [1-3, 12, 13]. Принималось допущение, что при небольших скоростях, с которыми происходит перемещение ПА, коэффициент сопротивления движению падает обратно пропорционально скорости, поэтому сила сопротивления движению ПА в воде растет пропорционально скорости перемещения [1-3]:

$$T(L, s) = -(m_{\text{по}} \cdot s^2 + k_{\text{по}} \cdot s) \cdot x(L, s), \quad (1)$$

где $k_{\text{по}}$ – коэффициент сопротивления воды движению ПА; $m_{\text{по}}$ – сумма массы ПА и его присоединенных масс, учитывающих инерционные гидродинамические силы, действующие на ПА; s – оператор Лапласа; L – длина троса.

$$T = E \cdot F \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial z} + \tau \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial z \partial t} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \beta \cdot \frac{\partial x}{\partial t},$$

где E – модуль упругости троса; F – площадь поперечного сечения троса; x – перемещение поперечного сечения троса в направлении продольной оси троса Oz , начало которой совпадает с его верхним концом; τ – постоянная времени внутреннего трения; m – масса единицы длины троса; β – коэффициент сопротивления единицы длины троса, учитывающий его трение о воду.

Фактически, уравнения движения троса [1-3] (второе уравнение в системе 2) и ПА (1) являются нелинейными. Сила сопротивления движению в воде ПО $T_{\text{по}}$ и троса T определяется квадратичными зависимостями от скорости:

$$T_{\text{по}} = -k_{\text{по}} \cdot V_{\text{по}} \cdot |V_{\text{по}}| - m_{\text{по}} \cdot \frac{\partial V_{\text{по}}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = m \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \beta \cdot V \cdot |V|, \quad (4)$$

где z – продольная ось троса, вдоль которой распределяется усилие T ; m – масса единицы длины троса.

На рис. 1 приведены графики, показывающие изменение перемещения поперечного сечения вдоль оси бесконечно длинного троса. Расчет производился для случая, когда изменение положения верхнего конца троса осуществляется с бесконечно большой скоростью, а амплитуда перемещения соответствует половине значительной высоты волны интенсивностью три-пять баллов:

$$x(t, 0) = 0,5(t) \div 1,5(t).$$

При задании второго граничного состояния полагалось, что нижний конец троса жестко закреплен. Исходная система уравнений (2) с учетом формулы (4) была преобразована в телеграфную форму [1, 2]:

$$m \cdot \frac{\partial V(t,z)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\tau \cdot \frac{\partial V(t,z)}{\partial z} + \frac{\partial x(t,z)}{\partial z} \right) \cdot E \cdot F = \quad (5)$$

$$= -\beta \cdot V(t,z) \cdot |V(t,z)|,$$

где x - перемещение поперечного сечения троса в направлении продольной оси троса z .

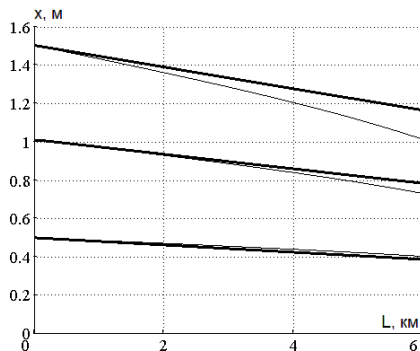


Рис. 1. Изменение перемещения вдоль оси бесконечно длинного троса в линейаризованной (утолщенные линии) и в нелинейной системе (тонкие линии)

На основании приведенных на рис. 1 зависимостей можно сделать вывод, что чем меньше интенсивность волнения, тем шире диапазон длин троса, в которых высока степень близости характеристик линейаризованной и нелинейной систем. СПУ предназначено для работы в условиях морского волнения интенсивностью три-четыре балла. В этом случае максимальное расхождение результатов расчетов в линейаризованной и нелинейной системе не превышает 5%. Такая погрешность не является существенной, поэтому при рассмотрении поведения САУ можно не учитывать нелинейный характер зависимости силы сопротивления движению троса в воде от скорости и использовать линейную систему уравнений (2). Следует заметить, что при повышении интенсивности волнения до пяти баллов расхождение возрастает до 15%. Погрешность будет расти и с увеличением рабочей длины троса (больше 6 км).

На рис. 2 приведены зависимости усилия в точке крепления ПО от скорости его движения при разных длинах троса: в линейной (пунктир) и нелинейной (сплошная линия) системах; 1 – $L=0,2$ км; 2 – $L=2$ км; 3 – $L=6$ км

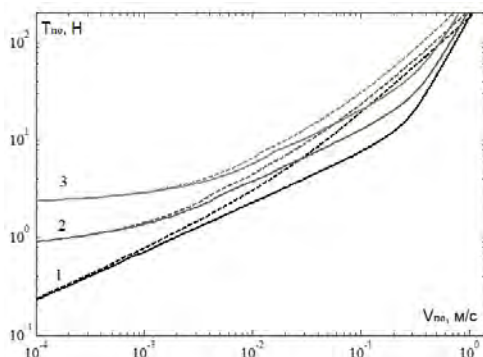


Рис. 2. Зависимость усилия в точке крепления ПО от скорости его движения при разных длинах троса: в линейной (пунктир) и нелинейной (сплошная линия) системах; 1 – $L=0,2$ км; 2 – $L=2$ км; 3 – $L=6$ км

На основании приведенных на рис. 2 зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Чем выше скорость движения ПО (например, больше интенсивность волнения или скорость ледянки), тем больше отличается поведение нелинейной и линейаризованной САУ.
2. Чем меньше длина троса, тем больше отличается поведение нелинейной и линейаризованной САУ. Это объясняется тем, что с ростом длины троса увеличивается влияние составляющей усилия, обусловленной динамикой троса, а в рассматриваемых моделях она одинакова.
3. Чем меньше скорость движения (интенсивность волнения), тем шире диапазон длин троса, в которых высока степень близости характеристик линейаризованной и нелинейной САУ.
4. В нелинейной системе сила сопротивления движению ПО меньше, чем в линейаризованной. Таким образом, фактическое значение коэффициента сопротивления ПО будет существенно меньше, чем принятое в расчетах. Следовательно, САУ может оказаться неустойчивой, или ее работа будет происходить вблизи границы устойчивости.

Нечеткое регулирование для коррекции коэффициента усиления регулятора в САУ АУ

Передаточная функция настраиваемого регулятора определяется выражением [12]

$$\frac{T_d(s)}{x_L(s)} = \frac{c_4 s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{s} \cdot \frac{k}{s + c_5}, \quad (6)$$

где T_d , x_L – усилие, развиваемое АУ, и ход стрелы СПУ в процессе компенсации соответственно; $c_0 \div c_5$, k – коэффициенты регулятора, зависящие от номинальных параметров ПА и СПУ.

Для повышения надежности работы нелинейной САУ предлагается осуществить коррекцию коэффициента усиления k робастного регулятора вида (6) методами нечеткой логики [11].

Принята структура нечеткого регулятора с двумя входными сигналами и одним выходным. При настройке регулятора на его первый вход подавалась информация о длине троса (0-6 км), на второй – об интенсивности волнения (3-5 баллов). Была выбрана стандартная база правил с семью термами для первого входного (0, 1, 2...6 км) и выходного сигналов и тремя термами для второго входного сигнала (амплитуды вертикальных перемещений грузового блока СПУ под действием поперечной качки при волнении 3-5 баллов). Термы входных переменных выбраны треугольными, для выходной – синглтоны.

Расчеты выполнялись для нелинейной САУ, для которой уравнение движения ПО определяется выражением (3), а значение максимального усилия на выходе регулятора ограничено по условиям выбора двигателя АУ [12]. Модель САУ показана на рис. 3. Здесь содержимое блоков определяется [1-3, 12]:

блок 1:

$$T_{по}(s) = T_0(s) \cdot ch(\tau_L \cdot r(s))^{-1} - V_{по}(s) \cdot th(\tau_L \cdot r(s)) \cdot Z_w(s) \cdot s^{-1};$$

блок 2: уравнение (1);

блок 3:

$$x_0(s) = T_0(s) \cdot \text{cth}(\tau_L \cdot r(s)) \cdot Z_w(s)^{-1} -$$

$$- T_{\text{по}}(s) \cdot \text{sh}(\tau_L \cdot r(s))^{-1} \cdot Z_w(s);$$
 блок 4: ограничение электромагнитной составляющей усилия;
 блок 5: нечеткий регулятор с двумя входами;
 блок 6: формула (6);

$$Z_w(s) = \sqrt{E \cdot F \cdot m \cdot (s^2 + \beta \cdot m^{-1} \cdot s) \cdot (1 + \tau \cdot s)} -$$
 волновое сопротивление;

$$r(s) = \sqrt{\frac{s^2 + \beta \cdot m^{-1} \cdot s}{1 + \tau \cdot s}} -$$
 коэффициент распространения колебаний в тросе;

$R(s) = m_c \cdot s^2$ - передаточная функция усилия, соответствующая динамической составляющей момента нагрузки АУ;

$R_2(s) = m_2 \cdot s^2$ - передаточная функция усилия, соответствующая динамической составляющей момента АУ;

m_c, m_2, m - коэффициенты, учитывающие инерцию подвижного элемента АУ, АУ с нагрузкой и удельная масса троса соответственно.

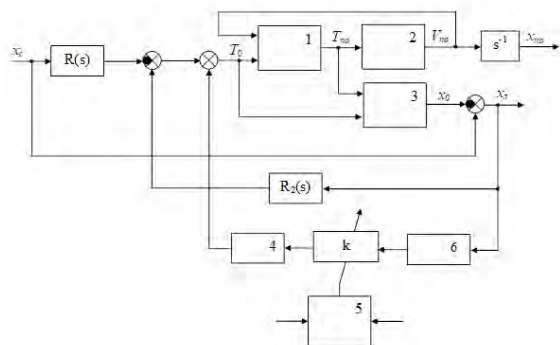


Рис. 3. Структурная схема нелинейной САУ

На рис. 4 в формате 3D и на рис. 5 в формате 2D (для фиксированных значений вертикальных перемещений грузового блока СПУ) приведены результаты выбора коэффициента усиления нечеткого регулятора в зависимости от рабочей длины троса и амплитуды перемещения грузового блока СПУ.

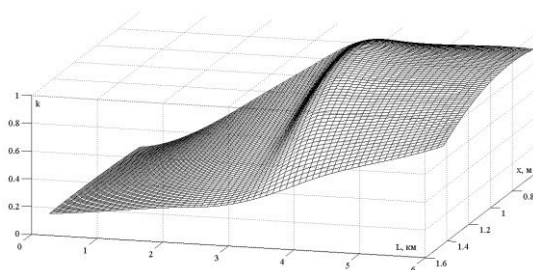


Рис. 4. 3D-зависимость коэффициента усиления нечеткого регулятора от длины троса и амплитуды перемещения грузового блока СПУ

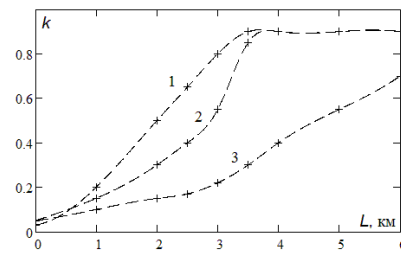


Рис. 5. 2D-зависимость коэффициента усиления нечеткого регулятора от длины троса и амплитуды перемещения грузового блока СПУ: 1 – волнение 3 балла; 2 – волнение 4 балла; 3 – волнение 5 баллов

В линеаризованной САУ $k=1$. Показанные закономерности полностью соответствуют сделанным выводам.

Результаты

На рис. 6 показаны графики среднеквадратических перемещений верхнего конца троса и ПО для линеаризованной и нелинейной САУ. Как видно из рис. 6, благодаря действию АП среднеквадратические перемещения точки подвеса троса и ПО уменьшаются в десятки раз.

Несколько худшие показатели работы нелинейной САУ объясняются видом результирующих АЧХ фильтра, которые показаны на рис. 7. Характеристики получены при подаче на вход сигналов с амплитудами 0,61 м, 1,03 м и 1,44 м, что соответствует перемещению грузового блока СПУ под действием поперечной качки при волнении 3-5 баллов.

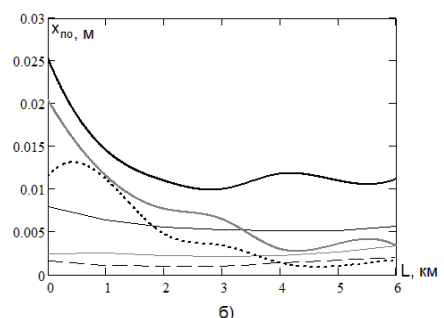
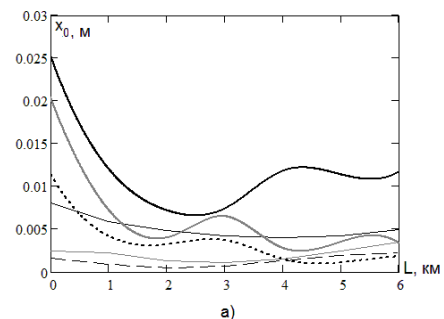


Рис. 6. Среднеквадратические перемещения верхнего конца троса (а) и ПО (б) для линеаризованной (тонкие линии) и нелинейной САУ (утолщенные линии): при волнении 3 балла (черный пунктир); 4 балла (серые линии); 5 баллов (черные линии)

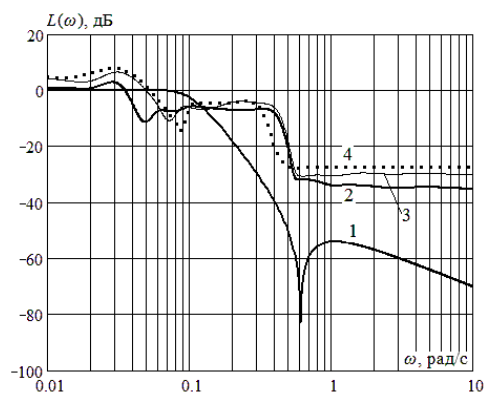


Рис. 7. ЛАЧХ: 1 – в линейризованной САУ; в нелинейной САУ при волнении: 2 – 3 балла; 3 – 4 балла; 4 – 5 баллов

Как видно из рис. 7, в диапазоне частот качки судна ($\omega = 0,5 \div 2$ рад/с) амплитуда выходного сигнала в полосе подавления в нелинейной САУ больше, чем в линейной.

Для сравнения на рис. 8 приведены результаты работы нелинейной САУ с робастным и нечетким регуляторами. По оси ординат показано, во сколько раз уменьшаются перемещения точки подвеса троса (а) и ПА (б) при использовании АУ.

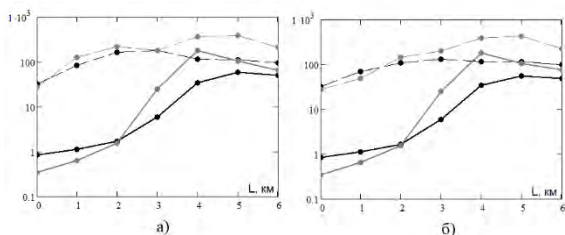


Рис. 8. Уменьшение вертикальных перемещений точки подвеса троса (а) и ПА (б): при волнении 3 балла (серый цвет) и 5 баллов (черный цвет); с робастным регулятором (сплошные линии); с нечетким регулятором (пунктир)

Как видно из рис. 8, использование нечеткого регулятора существенно снижает вертикальные перемещения как точки подвеса троса, так и ПА.

Для повышения эффективности работы нечеткого регулятора можно увеличить число входных сигналов в соответствии с количеством входов линейного регулятора. Однако, полученные численные значения перемещения ПО и точки повеса троса (рис. 8) свидетельствуют об эффективной работе САУ и для случая использования нечеткого регулятора рассмотренной структуры.

Заключение

Выполненное исследование позволяет сформулировать рекомендации:

при рассмотрении поведения САУ АУ в условиях морского волнения 3-4 балла и при длине троса до 6 км зависимость силы сопротивления движению троса в воде от скорости можно считать линейной и использовать систему уравнений (2);

при интенсивности волнения от пяти баллов и выше и/или увеличении длины троса (больше 6 км) для повышения эффективности САУ АУ при настройке регулятора рекомендуется использовать уравнения (3), (4);

снижение значения коэффициента сопротивления при движении ПО в нелинейной САУ может привести к потере устойчивости или к существенному снижению запаса устойчивости;

для повышения надежности работы нелинейной САУ АУ предлагается осуществить коррекцию коэффициента усиления регулятора методами нечеткой логики с использованием информации о длине троса и об интенсивности волнения.

Расчеты показали, что АУ с предложенной структурой и нечетким регулятором позволяет уменьшить среднеквадратические перемещения точки подвеса троса и ПО, вызванные качкой судна-носителя, в десятки раз.

Литература

1. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.
2. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Влияние морского ветрового волнения на глубоководный привязной объект: монография. Владивосток: Дальнаука, 2008. – 223 с.
3. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В., Чепурин П.И. Электроснабжение и стабилизация глубины погружения подводной зарядной станции: монография. Владивосток: Дальнаука, 2015. - 155 с.
4. Chupina K V and Kuvshinov G E 2017 Automatic control system for underwater autonomous vehicles power supply Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (St. Petersburg: IEEE) – P. 8076183. – DOI 10.1109/ICIEAM.2017.8076183. – EDN UYFFGO.
5. N. Xianliang, Z. Jiawen and X. Jianan, The heave motion estimation for active heave compensation system in offshore crane, 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2016, pp. 1327-1332, doi: 10.1109/ICMA.2016.7558755.
6. X. Huang, J. Wang, Y. Xu, Y. Zhu, T. Tang and M. Lv, Research on Heave Compensation Control of Floating Crane Based on Permanent Magnet Synchronous Motor, 2018 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hangzhou, China, 2018, pp. 331-336, doi: 10.1109/ICCAIS.2018.8570420.
7. T. Xie, D. Zou, L. Huang and D. Liu, Modelling and Simulation Analysis of Active Heave Compensation Control System for Marine Winch, 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510235.
8. C. Calnan, R. J. Bauer and R. A. Irani, Reference-Point Algorithms for Active Motion Compensation of Towed Bodies, in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, no. 4, pp. 1024-1040, Oct. 2019, doi: 10.1109/JOE.2018.2866317.

9. T. Eijkhout and J. Jovanova, Active heave compensation of a floating crane using electric drive, 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Delft, Netherlands, 2021, pp. 1089-1094, doi: 10.1109/AIM46487.2021.9517502.
10. Спускopодъёмное устройство: пат. RU 2381133 / Г.Е. Кувшинов, Л.А. Наумов, Чупина К.В., Радченко Д.В., П.И. Чепурин; патентообладатель ИПМТ – заявл. 04.06.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. №4.
11. Chupina K V and Usoltsev V K 2017 Fuzzy control electric drive for a vessel descent-rise device Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (St. Petersburg: IEEE). – P. 8076323. – DOI 10.1109/ICIEAM.2017.8076323. – EDN XXXWZV.
12. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters «cable – towed underwater vehicle / K.V. Chupina, E.V. Kataev, A.M.K. Annanov, V.N. Korshunov, I.A. Sennikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015 (3). – № 032167. – P. 032167. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032167. – EDN XYCRZB.
13. Chupina, K.V., Kataev, E.V., & Sennikov, I. (2018). Robust Control System for Vessel Descent-Rise Device with Heave Compensation Capability. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 1-4. – P. 8728832. – DOI 10.1109/ICIEAM.2018.8728832. – EDN QLUYHP.
14. Chupina, K. V. Automatic control system of damping winch to compensate influence of heave of parent vessel and to stabilize immersion depth of towed underwater vehicle / K. V. Chupina, D. A. Kachanov // Journal of Physics: Conference Series : 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020, Novosibirsk, 06–08 апреля 2020 года. Vol. 1661. – BRISTOL, ENGLAND: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 012112. – DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012112. – EDN MAGMRT.
15. Chupina, K. V. Numerical simulation and control loop optimization of the electric heave compensation system for the ship crane / K. V. Chupina, A. M. Khannanov, V. K. Usoltsev // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 2021. – P. 012056. – DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012056. – EDN CYQNaN.

References

1. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Chupina K.V. Sistemy` upravleniya glubinoj pogruzheniya buksiruemy`x ob`ektov [Automatic control systems of towed underwater vehicle's immersing depth]: monografiya. Vladivostok: Dal'nauka, 2005. – 285 s.
2. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Chupina K.V. Vliyanie morskogo vetrovogo volneniya na glubokovodny`j privyaznoj ob`ekt [Influence of sea waves on underwater vehicle's immersing depth]: monografiya. Vladivostok: Dal'nauka, 2008. – 223 s.
3. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Chupina K.V., Chepurin P.I. E`lektrosnabzhenie i stabilizaciya glubiny` pogruzheniya podvodnoj zaryadnoj stancii [Power supply and stabilization of underwater charging station's immersing depth]: monografiya. Vladivostok: Dal'nauka, 2015. – 155 s.
4. Chupina K V and Kuvshinov G E 2017 Automatic control system for underwater autonomous vehicles power supply Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (St. Petersburg: IEEE) – P. 8076183. – DOI 10.1109/ICIEAM.2017.8076183. – EDN UYFFGO.
5. N. Xianliang, Z. Jiawen and X. Jianan, The heave motion estimation for active heave compensation system in offshore crane, 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2016, pp. 1327-1332, doi: 10.1109/ICMA.2016.7558755.
6. X. Huang, J. Wang, Y. Xu, Y. Zhu, T. Tang and M. Lv, Research on Heave Compensation Control of Floating Crane Based on Permanent Magnet Synchronous Motor, 2018 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hangzhou, China, 2018, pp. 331-336, doi: 10.1109/ICCAIS.2018.8570420.
7. T. Xie, D. Zou, L. Huang and D. Liu, Modelling and Simulation Analysis of Active Heave Compensation Control System for Marine Winch, 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510235.
8. C. Calnan, R. J. Bauer and R. A. Irani, Reference-Point Algorithms for Active Motion Compensation of Towed Bodies, in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, no. 4, pp. 1024-1040, Oct. 2019, doi: 10.1109/JOE.2018.2866317.
9. T. Eijkhout and J. Jovanova, Active heave compensation of a floating crane using electric drive, 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Delft, Netherlands, 2021, pp. 1089-1094, doi: 10.1109/AIM46487.2021.9517502.
10. Спускopодъёмное устройство: пат. RU 2381133 / Г.Е. Кувшинов, Л.А. Наумов, Чупина К.В., Радченко Д.В., П.И. Чепурин; патентообладатель ИПМТ – заявл. 04.06.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. №4.
11. Chupina K V and Usoltsev V K 2017 Fuzzy control electric drive for a vessel descent-rise device Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (St. Petersburg: IEEE). – P. 8076323. – DOI 10.1109/ICIEAM.2017.8076323. – EDN XXXWZV.
12. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters «cable – towed underwater vehicle / K.V. Chupina, E.V. Kataev, A.M.K. Annanov, V.N. Korshunov, I.A. Sennikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015 (3). – № 032167. – P. 032167. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032167. – EDN XYCRZB.
13. Chupina, K.V., Kataev, E.V., & Sennikov, I. (2018). Robust Control System for Vessel Descent-Rise Device with Heave Compensation Capability. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 1-4. – P. 8728832. – DOI 10.1109/ICIEAM.2018.8728832. – EDN QLUYHP.
14. Chupina, K. V. Automatic control system of damping winch to compensate influence of heave of parent vessel and to stabilize immersion depth of towed underwater vehicle / K. V. Chupina, D. A. Kachanov // Journal of Physics: Conference Series : 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020,

Novosibirsk, 06–08 апреля 2020 года. Vol. 1661. – BRISTOL, ENGLAND: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 012112. – DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012112. – EDN MAGMRT.

15. Chupina, K. V. Numerical simulation and control loop optimization of the electric heave compensation system for the ship crane / K. V. Chupina, A. M. Khannanov, V. K. Usoltsev // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 2021. – P. 012056. – DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012056. – EDN CYQNAN.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чупина Кира Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент отделения машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: chupina.kv@dvfu.ru

Kira V. Chupina, Ph.D. (Eng), assistant professor, 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: chupina.kv@dvfu.ru

Ханнанов Андрей Мусавирович, 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: khannanov.am@dvfu.ru

Andrey M. Khannanov, Ph.D. (Eng), 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: khannanov.am@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 03.09.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 16.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 20.10.2023.

Научная статья

УДК 639.2+311

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.037>

Реализация модели многовидовой промысловой системы

Лисиенко С.В.¹ lisienkosv@mail.ru, Иванко Н.С.¹ ivns@mail.ru¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В работе предлагается описание реализованной модели многовидовой промысловой системы «промысловая зона». Модель представляет собой комплекс прикладных программ связанных между собой и реализующий формирование оптимального состава флота по заданным критериям для добычи промысловых объектов. В статье подробно рассмотрен процесс работы с разработанным программным комплексом в виде этапов оптимизации. Всего в модели предусмотрено девять последовательных этапов, результат каждого этапа представляет собой решение частной задачи, входящей в комплекс решаемых задач. Решение каждого этапа может быть использовано при принятии управленческих решений в промышленном рыболовстве. Для работы программного комплекса используется база данных промысловой статистики разработанная авторами, на основании которой производятся дополнительные расчеты упрощающие работу с программным комплексом. Программный комплекс реализован на языке программирования C# и зарегистрирован.

Ключевые слова: многовидовая система, промысловая зона, промысловый объект, водные биологические ресурсы, промысловые суда, моделирование, оптимизация, комплекс программ.

Для цитирования: Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Реализация модели многовидовой промысловой системы, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 305—311. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.037

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.037>

Implementation of a multispecies fishing system model

Svetlana V. Lisienko¹ lisienkosv@mail.ru, Nina S. Ivanko¹ ivns@mail.ru¹ Far Eastern state technical fishery University, Russian Federation

Abstract. The paper offers a description of the implemented model of a multi-species fishing system “fishing zone”. The model is a set of application programs interconnected and implementing the formation of the optimal composition of the fleet according to specified criteria for the production of commercial objects. The article discusses in detail the process of working with the developed software package in the form of optimization stages. In total, the model provides nine successive stages, the result of each stage is a solution to a particular problem included in the complex of problems being solved. The solution of each stage can be used when making management decisions in industrial fishing. To operate the software package, a fishing statistics database developed by the authors is used, on the basis of which additional calculations are made to simplify the work with the software package. The software package is implemented in the C# programming language and registered.

Key words: multi-species system, fishing zone, fishing object, aquatic biological resources, fishing vessels, modeling, optimization, set of programs.

For citation: Svetlana V. Lisienko, Nina S. Ivanko, Implementation of a multispecies fishing system model, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 305—311. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.037

Введение

Ведение рыбодобывающей деятельности сложный стохастический процесс, на который оказывают значительное влияние управляемые и неуправляемые факторы [1–4]. Влияние факторов различной природы на процесс добычи промысловых объектов и количественные показатели добычи рассмотрены авторами ранее [3,4]. Основная цель моделирования многовидовой системы «промысловая зона» это формирование оптимального состава флота для добычи водных биологических ресурсов с учетом большинства факторов, а так же создание инструмента позволяющего осуществлять планирование и управление рыбодобывающей деятельностью.

1. Оптимизационная модель

Результатом моделирования процессов и систем организации планирования и управления работой

промыслового флота стал разработанный программный комплекс прикладных программ. В его состав входят:

- База данных частью, которой стала база данных «Промысловая статистика рыбодобывающей деятельности в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне»;
- Компьютерная программа «Моделирование процесса планирования количества и типового состава добывающего флота в статическом состоянии промысловой системы»;
- Компьютерная программа «Моделирование процессов и систем по организации, планированию и управлению промысловым флотом»;
- Компьютерная программа, состоящая из трех модулей: «Модуль расчета рейсооборота добывающего судна», «Модуль расчета и оптимизации промыслово-технологического режима добывающего судна», «Модуль расчета оптимальной формы организации промысла».

Обобщенная модель организации промысла, а также связь этапов моделирования и разработанного программного комплекса представлена на рисунке 1.

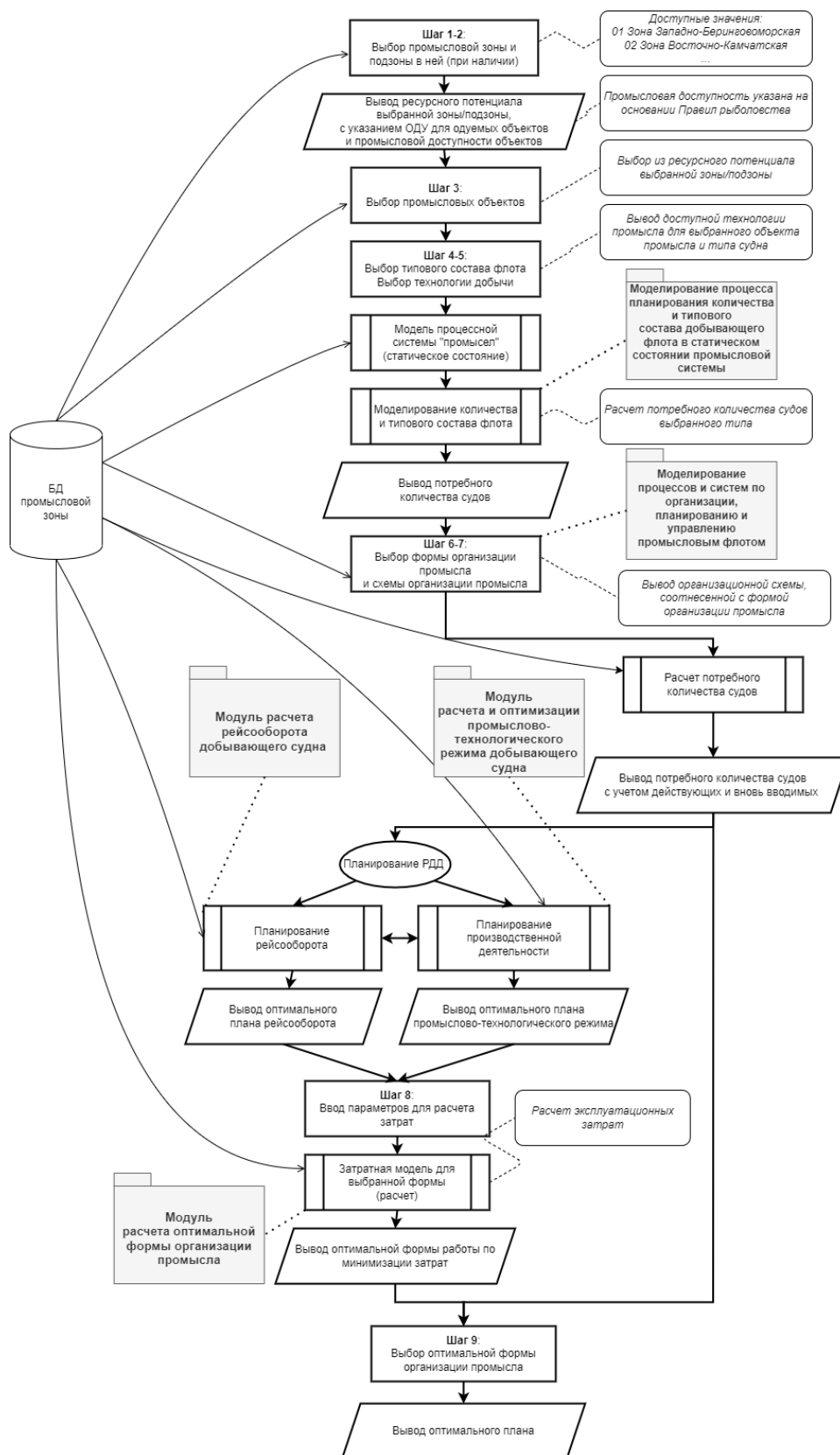


Рис. 1. Обобщенная оптимизационная модель системной организации ведения добычи водных биологических ресурсов

Структура базы данных «Промысловая статистика рыбодобывающей деятельности в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне» и пример данных описаны в [5]. База данных промысловой зоны используемая в обобщенной модели является дополненной базой «Промысловая статистика рыбодобывающей деятельности в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне».

Обобщенная модель, представленная на рисунке 1, включает в себя алгоритм получения оптимального состава флота при заданных условиях и ограничениях.

Как и любая другая оптимизационная задача, данная модель описывает последовательность шагов для специалиста по организации, планированию и управлению промысловым флотом. Каждый шаг связан с выбором того или иного действия, корректировкой полученных результатов или анализом возможных иных результатов. Предложенный алгоритм не является полностью автоматическим, и каждый шаг обязательно контролируется исполнителем, который является специалистом в области управления промысловым флотом. Предложенный комплекс программных продуктов не несет задачи замены специалиста, его цель автоматический расчет сложных операций и предоставление альтернативных вариантов.

2. Этапы оптимизации

Шаги 1–2. Начало работы связано с выбором промысловой зоны (подзоны) из имеющегося в базе данных перечня доступных зон и подзон рыбодобывающих бассейнов. Выбор осуществляется из перечня представленного в виде выпадающего списка. В соответствии с Правилами рыболовства общие допустимые уловы (ОДУ) могут быть установлены и для зоны и для подзоны. Далее осуществляется вывод на экран ресурсного потенциала выбранной промысловой зоны (подзоны) с указанием качества промысловых объектов: одуемые или неодуемые, значений ОДУ для одуемых промысловых объектов, внесенных в базу данных (пример отображения данных на рисунке 2). Т.к. база данных содержит данные за несколько лет, для отображения выбираются данные соответствующие последнему внесенному году. В качестве примере далее рассматривается задача оптимизации флота для добычи кальмара командорского в Северо-Курильской зоне.

После анализа промысловых объектов зоны (или подзоны) следующий шаг это выбор промыслового объекта.

Шаг 3. Для каждого промыслового объекта имеющегося в базе собрана статистика его добычи, т.е. периоды промысловой доступности объекта, которые могут контролироваться Правилами рыболовства (например, запрет на добычу в определенный период) или биологическими причинами, среднесуточный вылов и прочее. При выборе объекта отображается годовой график промысловой доступности объекта, периоды промысловой доступности окрашены белым цветом, периоды запрета согласно Правил рыболовства, если такие имеются, красным цветом и периоды прочей промысловой недоступности объектов – синим цветом (рисунок 2). Для командорского кальмара в Северо-Курильской зоне не

устанавливаются временные рамки запретов добычи объекта. Фактически период промысловой доступности объекта это апрель–ноябрь, но в период декабрь–февраль кальмар добывается как прилов при добыче иных водных биологических ресурсов.

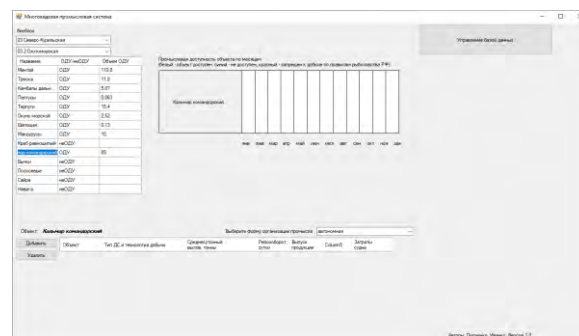


Рис. 2. Главное окно с выбранной промысловой зоной и объектом промысла

Шаги 4–5. Следующий шаг это выбор добывающего судна и технологии добычи промыслового объекта. Данный шаг напрямую связан с результатом выбора объекта на предыдущем шаге. Выбор добывающего судна и технологии добычи происходит на основании имеющихся в базе данных промысловых цепочек «объект-технология-судно». Как только выбрана нужная связка автоматически из базы данных добавляется информация о среднесуточном вылове. Например, кальмар командорский добывается траловой технологией с использованием донных тралов в качестве орудия лова, для примера выбран тип добывающего судна СРТМ. Согласно имеющейся в базе данных информации средний суточный вылов для данного типа судна составляет 36 т.

Результатом шагов 1–5 является решение задачи оптимального состава добывающего флота в статическом состоянии, т.е. расчет потребного количества судов выбранного типа. Корректировка решения задачи проводится при каждом выборе типа судна. Таким образом, оптимизация может быть выполнена как для судов одного типа, так и для судов нескольких типов. При этом суда даже одного типа могут использовать различные технологии промысла.

Шаги 6–7. Выбор формы и схемы организации промысла. На этом шаге оптимизация проводится с учетом выбранной формы организации промысла с соответствующими им организационными схемами. Особенность данных шагов является оптимизация с возможностью введения новых производственных мощностей.

Для расчетов на данном этапе используется ситуационно-сценарный подход. Для достижения поставленных целей необходимо выбрать оптимальный сценарий. Выбор сценария предоставлен пользователю, т.е. специалисту в области управления.

Первый сценарий предусматривает идеальную ситуацию, в которой на предыдущих этапах был достигнут оптимальный состав флота, т.е. уже определено потребное количество судов с учетом вновь вводимых судов или на основе имеющегося флота. В этом случае шаг 8 будет пропущен и будет

осуществлен автоматический переход к шагу 9 основного алгоритма решения задачи.

Второй сценарий используется, если необходимо произвести планирование рыбодобывающей деятельности (на схеме планирование РДД) каждого судна указанного в оптимизационном решении, полученном на шаге 5. Процесс планирования РДД состоит из двух взаимосвязанных этапов, каждый из которых должен быть выполнен для каждого типа судна и зависит от используемой данным судном технологии добычи, т.е. от того какой был выбран объект промысла на первом шаге. Для выбранного типа судна с уже определенной заранее технологией добычи связанной с выбранным объектом автоматически из базы данных определяется среднестатистическое значение суточного вылова промыслового объекта, т.е. значение которое считается нормой для данного типа судна с указанной технологией добычи. Это значение в дальнейшем используется как начальное для определения оптимального суточного вылова, что позволит рассчитать ожидаемый вылов за рейс. Значение может быть скорректировано пользователем если он считает это необходимым, например, если статистические данные частной компании отличаются от общепринятых.

Первый этап оптимизации это планирование рейсооборота, с учетом непроизводственных и внутрипроизводственных потерь времени [6]. Для расчета используется соответствующий модуль программного комплекса, основное окно представлено на рисунке 3. Потери времени выделены в три барьера: первый – непроизводственные потери времени, связанные с переходами между районами промысла, а так же прочие потери связанные с движением судна, второй – непроизводственные потери внутри производственного процесса по добычи объекта, третий – внутрипроизводственные потери времени при проведении каждой технологической операции. Большое влияние на среднесуточный вылов оказывают потери времени третьего барьера, в то время как потери остальных двух барьеров оказывают влияние на длительность времени лова. Характеристики судна и норма расхода и запаса горюче-смазочных материалов и пресной воды автоматически выбираются из базы данных на основании внесенных ранее данных (тип судна выбирается на предыдущем шаге). Если данные судна не соответствуют стандартным имеющимся в базе данных, например для модернизированного судна, необходимо внести новые сведения о судне в базу данных для дальнейшего использования. Среднесуточный вылов (норма) так же выбирается автоматически из базы данных, но после корректировки потерь времени может изменить свое значение как на большее, если потери времени уменьшаются, так и на меньшее, если потери времени увеличиваются. Для удобства пользователя расчеты проведенные на данном этапе можно экспортировать в текстовый документ Word.

Рис. 3. Окно модуля первого этапа оптимизации (расчет рейсооборота)

Полученное на первом этапе значение скорректированного суточного вылова поступает на следующий этап – планирование производственной деятельности. Здесь для расчета пользователь может выбрать, то значение суточного вылова, которое считает наиболее вероятным. На выбор предоставлено одно из четырех возможных значений: средний суточный вылов (норма) – значение выбираемое из базы данных для данного промыслового объекта, откорректированный суточный вылов (выбирается по умолчанию) – значение рассчитанное на предыдущем шаге с учетом барьеров, средневзвешанный суточный вылов – значение так же выбираемое из базы данных на основе данных об уловах для данного типа судна и промыслового объекта за несколько лет [7], установленный суточный вылов – значение скорректированное пользователем в пределах 50-150% от среднего суточного вылова.

На основании выбранного пользователем суточного вылова программа автоматически указывает к какому типу промыслово-технологического сценария относится выбранное значение суточного вылова (рисунк 5), что дает возможность оценить нагрузку на производственные линии еще на этапе планирования[8]. При этом если скорректированное значение среднесуточного вылова будет составлять 80-120% от суммарной мощности технологических линий добывающего судна, то считается что судно работает по

Также, как и на предыдущем этапе данные по судам (производственные мощности технологический линий) автоматически выбираются из базы данных, но здесь они могут быть скорректированы перед расчетом. Долю сырья расходуемую на производство продукции указывает пользователь, он так же определяет количество видов продукции и их характеристики (норма выхода готовой продукции из единицы сырья и затраты на изготовление продукции). Пример результатов расчетов данного этапа представлен на рисунке 4. Результаты расчетов так же как на первом этапе могут быть отправлены в Word.

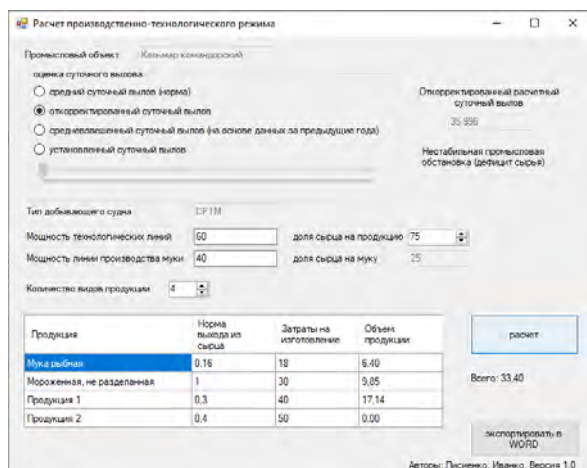


Рис. 4. Окно модуля второго этапа оптимизации (расчет промыслово-технологического режима)

Шаг 8. Расчет затрат. На данном шаге результаты всех произведенных ранее расчетов формируются в основной таблице. На основании произведенных расчетов указываются следующие расчеты: длительность рейсов для выбранной формы организации промысла, длительность рейсов для альтернативной формы организации промысла, оптимальное значение суммарного суточного выпуска продукции. Все перечисленные значения используются для расчета суммарных затрат.

Для расчета затрат используется соответствующий модуль. Окно расчета представлено на рисунке 5. Нормативные данные по расходу топлива, горюче-смазочных материалов, пресной воды и нормы времени для стоянки судна в порту выбираются автоматически из базы данных и не могут быть скорректированы пользователем.

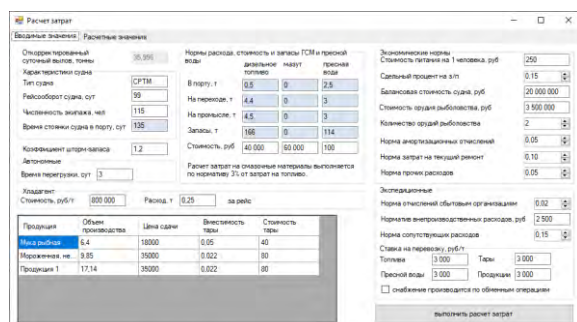


Рис. 5. Окно модуля расчета затрат

Рассчитанные ранее параметры работы судна так же автоматически добавляются в окно расчета. Расчет всех затрат производится по известной методике [8]. Результаты расчетов предоставляются пользователю в виде подробного расчета с возможностью вывода в текстовый документ.

Последний шаг это оптимизация по критерию минимизации затрат.

Шаг 9. Оптимизация работы промыслового флота при условии минимизации затрат. Для выполнения оптимизации пользователь указывает необходимый процент освоения ОДУ, который соответствует выбранной стратегии управления промыслом. В результате решения оптимизационной задачи [9] вычисляется требуемое количество судов каждого типа для освоения промыслового объекта. Пользователю предоставляется ранжированный список вариантов расчетов. Пример результатов расчетов представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Результат оптимизации

В рассмотренном примере представлен результат оптимизации для одного промыслового объекта и нескольких типов судов, которые могут быть использованы на промысле данного объекта. Однако разработанный программный комплекс может быть использован и для оптимизации добычи нескольких промысловых объектов. В таком случае пользователь последовательно выполняет шаги с 3 по 8 для каждого объекта, а оптимизация на шаге 9 выполняется для всех рассматриваемых промысловых объектов. Результат оптимизации это перечень необходимых судов для освоения выбранных промысловых объектов в некоторой промысловой зоне для достижения установленных значений объемов ОДУ или рекомендованных значений объемов вылова (добычи).

Заключение

На основании проведенных ранее исследований, основная цель которых была моделирование и оптимизация рыбодобывающих процессов и систем был разработан комплекс программных средств для моделирования и оптимизации логистической системы «промысловая зона». Весь рассмотренный программный комплекс реализован в виде базы данных и нескольких программ [10-15]. Для реализации был использован язык программирования C# и среда разработки Visual Studio. Разработанный комплекс программ может быть использован в учебном процессе для обучения студентов направления «Промышленное рыболовство», а так же рыбодобывающими компаниями для оптимизации промысловой деятельности.

Литература

1. Андреев М. Н., Студенецкий С. А. Оптимальное управление на промысле. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288 с.
2. Мельников В.Н., Мельников А. В. Совершенствование общей теории промышленного рыболовства //Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2010. № 1. с.42-53.

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. Моделирование системы «Промысел» на основе биотехнологического дуализма // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2021. № 3. С. 94–101. DOI: 10.24143/2073-5529-2021-3-94-101.
5. Грибова К.А., Иванко Н.С., Лисиенко С.В. Формирование базы данных промысловой статистики рыбодобывающей деятельности в дальневосточном рыбохозяйственном бассейне // Материалы VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Владивосток, 2023. С. 59-64.
6. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Планирование рейсооборота добывающих судов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 200-208. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.028.
7. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Формирование и оптимизация издержек производственной рыбодобывающей деятельности судов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-1 (54). С. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.056>
8. Лисиенко С.В. Совершенствование организации ведения добычи водных биологических ресурсов с целью успешной реализации стратегического развития отечественного рыболовства // Рыбное хозяйство. 2013. № 3. С. 17–21.
9. Мизюркин М.А., Лисиенко С.В., Гоголина Л.В. Рыбозаводы Приморья: организационные, управленческие, производственные проблемы в контексте современной теории и практики: монография. Владивосток: Дальрыбвтуз. 2001. 106 с
10. Лисиенко С.В., Вальков В.Е., Иванко Н.С., Бойцов А.Н. Разработка математической модели и оптимизационной задачи по организации и управлению промысловым флотом при ведении добычи водных биологических ресурсов на примере промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 147-153.
11. Лисиенко С.В., Иванко Н.С., Грибова К.А. Промысловая статистика рыбодобывающей деятельности в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623127, 28.11.2022, заявка № 2022623066 от 17.11.2022.
12. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Моделирование процесса планирования количества и типового состава добывающего флота в статическом состоянии промысловой системы // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021616757, 26.04.2021. Заявка № 2021615566 от 14.04.2021. – Modeling of the process of planning the number and typical composition of the mining fleet in the static state of the fishing system
13. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Модуль расчета рейсооборота добывающего судна // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021669032, 23.11.2021. Заявка № 2021667699 от 08.11.2021. – Module for calculating the voyage turnover of a mining vessel (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ)
14. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Модуль расчета оптимальной формы организации // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021669033, 23.11.2021. Заявка № 2021667697 от 08.11.2021. промысла – Module for calculating the optimal form of fishing organization (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ)
15. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Модуль расчета и оптимизации промыслово-технологического режима добывающего судна // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021669034, 23.11.2021. Заявка № 2021667696 от 08.11.2021. – Module for calculating and optimizing the production and technological regime of a mining vessel (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ)

References

1. Andreev M. N., Studenetskiy S. A. Optimal'noe upravlenie na promysle [Optimal management in the field], M.: Pishchevaya promyshlennost', 1975. – 288 s.
2. 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.
3. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modelirovanie protsessov vedeniya rybodobyvayushchey deyatel'nosti v mnogovidovoy promyslovoj 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. Modelirovanie sistemy «Promysel» na osnove biotekhnologicheskogo dualizma [Modeling «fishery» system using principles of biotechnological dualism], Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serija: Rybnoe hozjajstvo.
5. Gribova K.A., Ivanko N.S., Lisienko S.V. Formirovanie bazy dannyh promyslovoj statistiki rybodobyvayushchey deyatel'nosti v dal'nevostochnom rybokhozyaystvennom bassejne [Formation of a database of fishing statistics of fishing activities in the far eastern fishery basin] Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Vladivostok, 2023. S. 59-64.

6. 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. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.028.
7. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Formirovanie i optimizaciya izderzhek proizvodstvennoj rybodobyvayushchej deyatel'nosti sudov[], Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 4-1 (54). S. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.056>
8. Lisienko S.V. Sovershenstvovanie organizacii vedeniya dobychi vodnyh biologicheskikh resursov s cel'yu uspešnoy realizacii strategicheskogo razvitiya otechestvennogo rybolovstva[], Rybnoe hozyajstvo. 2013. № 3. S. 17–21.
9. Mizyurkin M.A., Lisienko S.V., Gogolina L.V. Rybozavody Primor'ya: organizacionnye, upravlencheskie, proizvodstvennye problemy v kon tekste sovremennoj teorii i praktiki[], monografiya. Vladivostok: Dal'rybvtuz. 2001. 106 s
10. Lisienko S.V., Val'kov V.E., Ivanko N.S., Bojcov A.N. Razrabotka matematicheskoy modeli i optimizacionnoj zadachi po organizacii i upravleniyu promyslovym flotom pri vedenii dobychi vodnyh biologicheskikh resursov na primere promysla dal'nevostochnoj sardiny (ivasi) i skumbrii v Dal'nevostochnom rybohozyajstvennom bassejne[], Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-2 (46). S. 147-153.
11. Lisienko S.V., Ivanko N.S., Gribova K.A. Promyslovaya statistika rybodobyvayushchej deyatel'nosti v Dal'nevostochnom rybohozyajstvennom bassejne[] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2022623127, 28.11.2022, zayavka № 2022623066 ot 17.11.2022.
12. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modelirovanie processa planirovaniya kolichestva i tipovogo sostava dobyvayushchego flota v staticheskom sostoyanii promyslovoj sistemy [Modeling of the process of planning the number and typical composition of the mining fleet in the static state of the fishing system], Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2021616757, 26.04.2021. Zayavka № 2021615566 ot 14.04.2021.
13. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modul' rascheta rejsooborota dobyvayushchego sudna [Module for calculating the voyage turnover of a mining vessel] Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2021669032, 23.11.2021. Zayavka № 2021667699 ot 08.11.2021.
14. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modul' rascheta optimal'noj formy organizacii promysla [Module for calculating the optimal form of fishing organization] Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2021669033, 23.11.2021. Zayavka № 2021667697 ot 08.11.2021.
15. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modul' rascheta i optimizacii promyslovo-tekhnologicheskogo rezhima dobyvayushchego sudna [Module for calculating and optimizing the production and technological regime of a mining vessel] Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2021669034, 23.11.2021. Zayavka № 2021667696 ot 08.11.2021.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лисиенко Светлана Владимировна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Svetlana V. Lisienko, Dr. Sci. (Eng), 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

Иванко Нина Сергеевна, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: ivns@mail.ru

Nina S. Ivanko, Lecturer of the Department of Industrial Fisheries, Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B e-mail: ivns@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 08.11.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.11.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2023.

Научная статья

УДК 656.61.052: 629.123: 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.038>

Разработка модели судна-робота с автоматической выработкой программы движения

Филатов В.И.¹ Filatov_viktor1994@mail.ru, **Астреин В.В.**¹ Astrein-vadim@rambler.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

Аннотация. Статья посвящена теме разработки модели морского автономного необитаемого надводного аппарата (АННА), способного в автоматическом режиме вырабатывать программу движения и следовать по ней. Целью статьи является построение модели АННА, прообразом которого является реальное судно, на основании данных, полученных из журналов автоматической регистрации информации в навигационных приборах судна. Выполняется оценка адекватности модели на наборах данных, не учтённых в построении модели АННА. Перед моделью стоит задача осуществить плавание между заданными координатами в узкости. Новизна заключается в том, что совместно решается ряд задач идентификации параметров модели, построения программы движения судна, а управления судном по маршруту в автоматическом режиме в реальном времени. Для решения задач используются методы из теории графов, вычислительной геометрии, математического анализа, теории автоматического управления, в том числе нелинейные модели, а также статистические методы обработки данных. Особую роль в данной статье играет выработка программы движения АННА, которая учитывает его манёвренные характеристики. В статье приводятся результаты численного моделирования АННА, автоматического построения программы управления движением, а также автоматическое осуществление программы движения по маршруту в условиях возмущений внешней среды, приведены результаты оценки моментов времени начала изменения направления движения; ещё одной особенностью статьи является сравнение сигналов управляющих воздействий органов управления АННА в зависимости от заданных ограничений и внешних условий.

Ключевые слова: автономное судно, программа управления движением, автоматизация, искусственный интеллект, автономные навигационные комплексы, судно-робот, МАНС.

Для цитирования: Филатов В.И., Астреин В.В. Разработка модели судна-робота с автоматической выработкой программы движения. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 1, С. 312—320. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.038

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.038>

Development of Vessel-Robot's Model with automatic generation of Steering Program

Viktor I. Filatov¹ Filatov_viktor1994@mail.ru, **Vadim V. Astrein**¹ Astrein-vadim@rambler.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Abstract. This article is about subject of development Model of Marine autonomous sailing vehicle (ASV), that can automatically generate its steering program by planning the route and execute it. This article directed to develop ASV model, which represented the behavior of original Vessel. Model has built, based on Data sourced from automatic registration information logs in navigational technical aids. Adequacy of Model tested on datasets, that were not used to build the Model ASV. There are following task exists – execute sailing between given coordinates in narrow channel. The novelty lies in sequential solvation of sub-tasks of ship's system identification, ship steering program generation, and automatic steering the vessel through automatically pre-programmed tack, to steer the ASV through route in real time. To Solve the tasks the following methods used: graph theory, computer geometry, mathematical analysis, automatic control theory included non-linear models, and statistical methods of data analysis. In this article spotlighted generation of ASV's steering program, that taken into account it's maneuvering characteristics. The results of building ASV model, automatic generation of steering program, and automatic execution of sailing through calculated route presents of outer noise demonstrated; presented the results of assessment the time-event moment of commencement of alteration direction of movement; one more result presented in the article – cross-reference of control system signals that generated in Control steering organs of ASV based on limitation order, given by operator and outer influence factors.

Keywords: autonomous vessel, steering control system, automatization, artificial intelligence, autonomous navigational systems, vessel-robot, UASV.

For citation: Viktor I. Filatov., Astrein V. Vadim. Development of Vessel-Robot's Model with automatic generation of Steering Program, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 312—320. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.038

Введение

В настоящее время морское судно является наиболее важным инструментом доставки различных грузов на дальние расстояния.

Существует множество задач, типов грузов и условий доставки, которые ставятся перед ним. Применительно к морской отрасли, таким направлением является создание полностью автономного судна. В рамках отечественной программы, ведётся разработка морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). В данном исследовании поставлена задача разработки и синтеза модели движения судна на основе статистических данных, собранных в результате эксплуатации судна-прототипа, автоматической выработки временной программы движения и автоматического управления судна по программной траектории. Данная статья может быть полезной при разработке автономных морских надводных аппаратов различного назначения, перед которыми стоит задача доставки грузов в автономном режиме.

Анализ данных для построения модели АННА

При рассмотрении той или иной системы исходным этапом ее изучения является определение ее границы. Так как речь идёт о системе автоматического управления АННА по заданной программе движения, то необходимо выделить объекты, относящиеся к внутренней системе, а также объекты, относящиеся к среде – такие объекты, которые не входят во внутреннюю системы, но непосредственно оказывают на неё влияние извне.

В рамках данного исследования, для построения модели движения АННА, собраны данные из навигационных приборов и систем и управления судна-прототипа, технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тактико-технические характеристики судна-прототипа

Характеристика	Значение	Ед.и
Класс судна	Танкер-Химовоз, IMO II	.
Длина	120	м
Об. водоизмещение	18 *10 ³	т
Ширина	20	м
Осадка	8,3	м
Мощность главного двигателя (номинальная)	5450 л.с. x 167 мин ⁻¹	
Гребной винт (профиль, диаметр)	1 x NACA 66, d=4.1 м	
Руль (профиль, площадь)	1 x NACA 0020, S=20.04 м ²	

Объектом управления является АННА. К его внутренней системе относятся органы управления судна: руль и главный двигатель (ГД). К среде относятся: положение и перемещение судна в горизонтальной плоскости.

На основании натурных экспериментов, характеризующихся в маневрировании судна при

заходе и выходе из порта, собраны экспериментальные данные, представляющие собой временные ряды. Запись данных осуществлена с многоканального автоматического судового регистратора (VDR), каналы которого передают информацию от электронного блока управления главным двигателем (ЭБУ ГД), авторулевого устройства, гирокомпас, автоматического приём-индикатора спутниковой радионавигационной системы (АПИ СРНС), лага и других технических средств. Характеристики временных рядов по каждой из переменных представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики временных рядов наблюдаемых параметров

Перем.	ТСС	Ед. Изм.	Дискретность
N	ЭБУ ГД	мин ⁻¹	0.5 с
δ	Авторулевое	Град.	0.5 с
ω	Гирокомпас	мин ⁻¹	0.5 с
ГКК	Гирокомпас	Град.	0.5 с
ПУФ	АПИ СРНС	Град.	0.5 с
Вл	Лаг	Узл.	0.5 с
Вф	АПИ СРНС	Град.	0.5 с

В таблице 2: n – частота вращения главного двигателя, δ – угол перекадки руля, ГКК – гирокомпасный курс, ПУФ – действительное направление движения, Вф – действительная скорость движения, Вл – относительная скорость движения.

На рисунке 1 представлены временные ряды для одного из натурных экспериментов по выходу судна из порта и маневрированию.

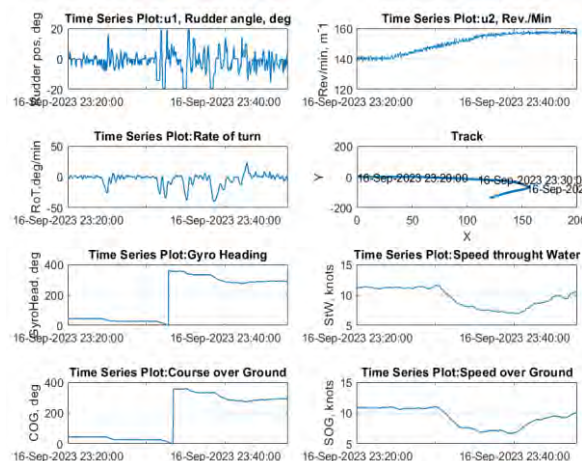


Рис. 1. Наблюдаемые параметры движения судна и органов управления.

Анализ переменных для построения модели «вход-выход»

Модели «вход-выход», называемые «Чёрным ящиком» широко используются при построении систем автоматического управления. [4, 7, 9] Данный тип модели выбрана, так как судно-прототип осуществляет плавание в одном регионе, в одном диапазоне своих эксплуатационных характеристик.

Для определения входных и выходных переменных необходимо определить статистическую взаимосвязь между всеми величинами. Рассчитана корреляционная матрица коэффициентов Пирсона:

$$\rho \approx \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}} \quad (1)$$

где: U_i, V_i – парные измерения из таблицы 2.

На графиках рисунка 2 показаны корреляционные взаимосвязи между всеми переменными, а также гистограммы распределения наблюдаемых переменных.

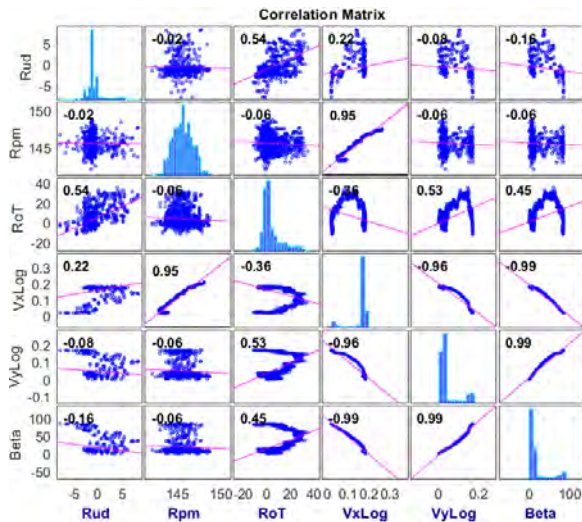


Рис. 2 Корреляционная матрица и графики их линейных корреляционных функций.

На основании корреляционного анализа и знаний из области управления судна, для построения модели динамики АННА, используются следующие зависимости:

$$\begin{aligned} v(t) &= f(n(t), |\omega(t)|); \\ \omega(t) &= f(\delta(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Задание криволинейного движения судна

Для задания криволинейного движения судна в пространстве, используются две системы координат [2, 3, 8]: система А – неподвижная, связанная с землёй, прямоугольная система координат $O\xi\eta$. В начальный момент времени (t_0) начало системы координат O совпадает с центром тяжести судна O . ξ – ось, направленная на север, η – ось, направленная на восток. Система Б – подвижная, связанная с судном, прямоугольная система координат Ox, y , с началом O в центре тяжести судна Ox – ось, направленная в нос судна по диаметральной плоскости, Oy – направлена из центра тяжести судна в правый борт, перпендикулярно диаметральной плоскости судна.

Переход из системы А в Б осуществляется по соотношениям:

$$\begin{aligned} \xi &= x \cos \theta - y \sin \theta; \\ \eta &= x \sin \theta + y \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

где: $\theta = \psi_v + \beta$. ψ_v – угол скорости центра тяжести судна, β – угол дрейфа.

Выражения для определения угла курса, координат и проекций скорости судна в система А

через параметры движения в системе Б имеют вид интегралов:

$$\begin{aligned} \xi &= \int_0^t v \cos(\theta - \beta) dt; \\ \eta &= \int_0^t v \sin(\theta - \beta) dt; \\ \theta(t) &= \int_0^t \omega dt + \theta_0. \end{aligned} \quad (4)$$

где: ω – угловая скорость вращения центра тяжести судна в плоскости Oxy , θ_0 – значение угла курса в момент $t_0 = 0$.

На рисунке 3 показаны системы координат А и Б, а также наблюдаемые параметры движения судна.

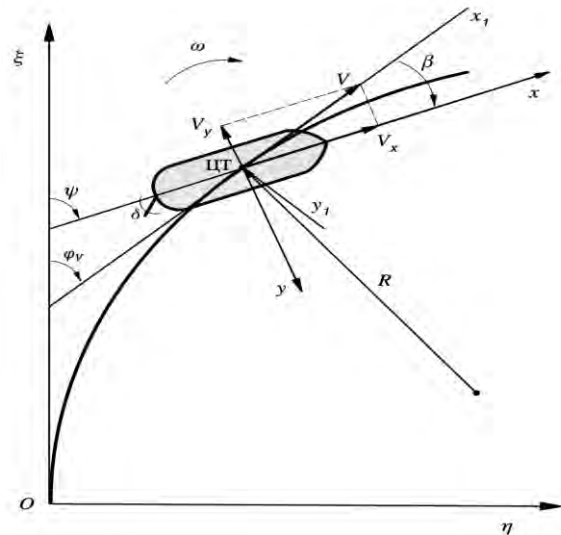


Рис. 3. Системы координат и параметры движения судна. Ox_1, y_1 – координаты траектории движения судна, R – радиус кривизны траектории ЦТ судна.

Построение модели динамической системы АННА с помощью идентификации параметров модели

Параметрическая идентификация – идентификация в узком смысле состоит в оценивании параметров и состояния системы по результатам наблюдений за входными и выходными переменными, полученными в результате функционирования объекта. [1, 4, 8]

Для построения системы автоматического управления, обеспечивающей высокоточные повороты путем изменения величины и знака угловой скорости судна с помощью угла перекадки руля, предлагается поэтапно осуществить построение и идентификацию модели изменения угловой скорости судна на повороте. [1, 8] Аналогично, для построения модели скорости судна осуществляется идентификация параметров модели изменения действительной скорости судна от частоты вращения главного двигателя и угловой скорости поворота судна, в соответствии с выражением (2).

Для идентификации параметров модели $\omega(t) = f(\delta(t))$ применён метод нелинейной авторегрессии (NARX). Данные нелинейные модели расширяют линейные модели ARX до нелинейного случая. Структура этих моделей позволяет моделировать сложное нелинейное поведение с помощью гибких нелинейных функций, таких как вейвлет и сигмоидные функции. [8]

Оценка модели NLARX [10,11] производится по выражению:

$$\hat{y}(t) = \mathbb{E}[y(t) | y(t-1), \dots, y(t-n_a), u(t-n_k), \dots, u(t-n_k-n_b+1)] \quad (5)$$

$$nm = [n_a, n_b, n_k].$$

где: $u = \delta, y = \omega$, n_a, n_b – порядок модели, n_k – задержка сигнала.

Идентификация параметров модели, при заданном порядке модели $n_a = 6$, $n_b = 2$, $n_k = 1$ выполнена с помощью сети с сигмоидной функцией активации. Оценка идентификации данной модели: 92,5%, $\sigma = 2,3^\circ/\text{мин}$. Результаты качества модели показаны на рис.4.

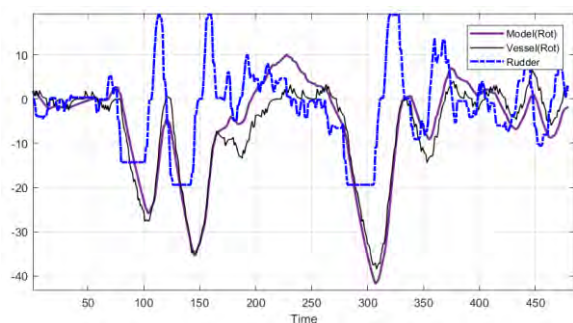


Рис. 4 Экспериментальные данные маневрирования судна и идентификация модели изменения угловой скорости от положения пера руля. Нелинейная авторегрессионная модель NLARX

Проверка адекватности модели выполнена путём тестирования модели на данных, не учтённых в идентификации параметров модели. Результаты сравнения модели и судна-прообраза показаны на рисунке 5.

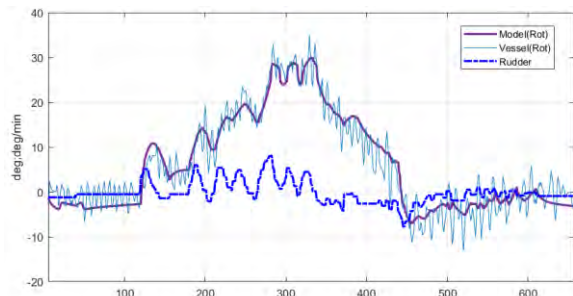


Рис. 5 Проверка адекватности модели. Нелинейная авторегрессионная модель NLARX. Оценка идентификации модели на независимых данных: 91,4 %, $\sigma = 1,9^\circ/\text{мин}$

Для описания модели скорости судна используется линейная модель дифференциальных уравнений в пространстве состояний в дискретном виде:

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k-1]; \quad (6)$$

$$\mathbf{y}[k] = \mathbf{C}\mathbf{x}[k] + \mathbf{D}\mathbf{u}[k].$$

Векторы $\mathbf{x}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{y}$ – обозначают переменный состояния входы и выходы для $k-1$ – го и k – го моментов времени, $\mathbf{H} = [\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}]$ – передаточная матрица коэффициентов модели.

Модель скорости состоит из трёх последовательных процессов:

1. Задание программы режима работы $n_o(t)$ ГД;
2. Выход ГД на заданный режим работы;
3. Отклик скорости на изменение режима работы.

Тогда обобщённая модель скорости судна на установившемся курсе формулируется, как:

$$V_x(t) = f(n(t), n_o(t));$$

$$\omega \cong 0, \frac{dn_o}{dt} \geq 0. \quad (7)$$

А модель прямолинейного движения судна в пространстве состояний определяется с помощью произведения передаточных матриц:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{H}_1 \times \mathbf{H}_2)\mathbf{u}; \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1\mathbf{C}_2 \\ 0 & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1\mathbf{D}_2 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [\mathbf{C}_1 \mathbf{D}_1 \mathbf{C}_2];$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_1\mathbf{D}_2.$$

где: $\mathbf{y} = V_x$, $\mathbf{u} = n_o$.

Данные для идентификации параметров модели представлены на рисунке 6.

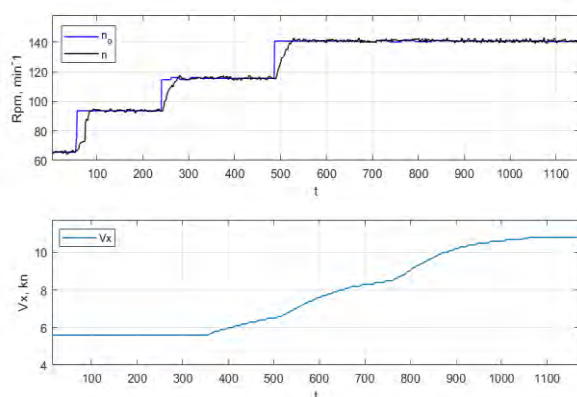


Рис. 6 Данные для идентификации параметров модели скорости судна при прямолинейном движении судна на заданном курсе

Второй составляющей скорости в формуле 2 является потеря в зависимости от абсолютного значения угловой скорости:

$$\Delta V(t) = \int \dot{V}(t) dt, \dot{V}(t) = f(|\omega(t)|). \quad (9)$$

Проверка адекватности модели выполнена на рядах данных при постоянном значении n_o системы в установившемся режиме $V_x(t) \approx const$, результаты прогнозирования показаны на рис.7.

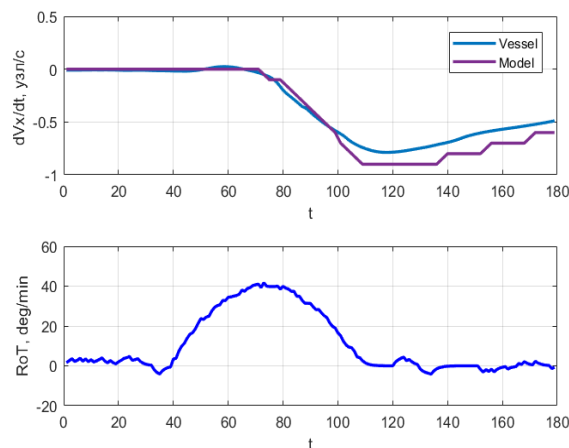


Рис. 7. Результаты идентификации модели потери скорости судна при движении от угловой скорости

Оценка качества модели

Выполнена оценка качества модели на данных, при натурном эксперименте по маневрированию судна в узкости, за период 25 минут. Оценке подлежат три наблюдаемых временных ряда: $V_x(t)$, $V_y(t)$, $\omega(t)$. Визуализация и оценка качества модели представлены на рисунках 8 – 10.

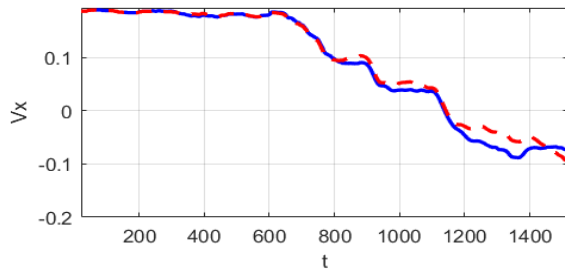


Рис. 8. Продольная составляющая скорости $V_x(t)$. $\sigma = 0.033$ узл.

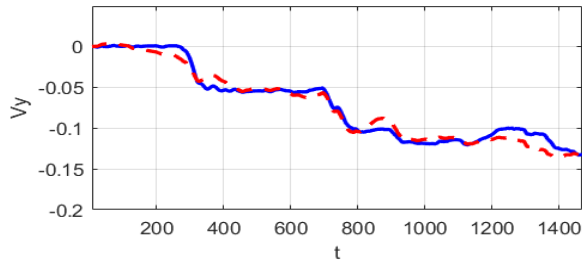


Рис. 9. Поперечная составляющая скорости $V_y(t)$. $\sigma = 0.024$ узл.

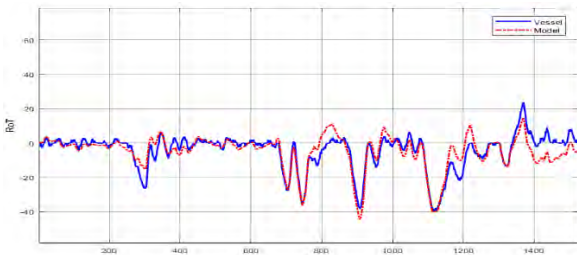


Рис. 10. Угловая скорость при следовании по заданному маршруту $\omega(t)$. $\sigma = 9.48$ °/мин.

При проведении серии экспериментов по оценке модели идентификации и сравнении с натурными данными маневрирования судна сделан вывод, что модель может быть применена для моделирования ситуации маневрирования судна в узкости, подходе и выходе порта и повышать порядок нелинейности нет необходимости, при условии диапазона скоростей $5 \leq V \leq 12$ узлов.

Построение программной траектории движения судна

Заданный маршрут судна является функцией от двух переменных (3) и имеет геометрическое положение на плоскости. Таким образом можно представить маршрут в виде графа с помощью геометрического способа задания. Тогда путевые точки (ПТ) представляют из себя множество вершин $P_{\Theta(t)} = \{p_0, p_1, \dots, p_N | p_i = (\xi_i, \eta_i)\}$, где $i = \overline{1, N}$ и p – вершина, соответствующая путевой точке начала

плавания. Каждой вершине соотносится некоторая материальная точка на плоскости.

Тогда линии заданного пути (ЛЗП), как прямые отрезки, соединяющие смежные вершины, образуют множество рёбер $E_{\Theta(t)} = \{e_1, e_k, \dots, e_M | e_k = [(\xi_i, \eta_i), (\xi_j, \eta_j)]\}$ где $k = \overline{1, M}$, e_k – ребро, соответствующее начальному управляющему воздействию – Θ_0 . На основании этого можно формализовать маршрут судна в виде графа:

$$G_{\Theta(t)} = (P_{\Theta(t)}, E_{\Theta(t)}) \quad (10)$$

Для решения этой задачи может применён метод построения графа на диаграмме Вороного, которая решает задачу вычислительной геометрии, состоящую в построении зон близости. Имеется вектор координат геометрических точек береговой черты, являющихся характерными точками (ХТ). ХТ-точки, принадлежащие контуру (границе) любого района, маршрута, обладающие отличительными (характерными) свойствами их расположения относительно остальных элементов (точек), т.е. значительно выступающие, впадающие или несущие отличительную информацию статических объектов навигационной обстановки. [5, 9]

При решении задачи безопасности плавания, предполагается, что плотность вероятности ограничений является двумерной и подчиняется равномерному закону распределения;

$$P_R = f(r_x, r_y) = \begin{cases} \frac{1}{\beta_x - \alpha_x}, & \alpha_x \leq r_x \leq \beta_x \\ \frac{1}{\beta_y - \alpha_y}, & \alpha_y \leq r_y \leq \beta_y \end{cases} \quad (11)$$

где: $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$ – значения параметров для задания интервалов, в которых происходит проверка принадлежности объекта к множеству ограничений.

Все вершины, являющиеся опасными, удаляются из графа:

$$\tilde{G}_{\Theta(t)} = G_{\Theta(t)} \setminus P_R \quad (12)$$

Далее решается задача оптимизации на графе между заданными точками [3, 9], а минимум критерия-функционала выражается, как:

$$\begin{aligned} \min \int_{t_0}^{t_F} f_0(p_1, p_2, \dots, p_N; u_1, u_2, \dots, u_M) dt &\equiv \\ \equiv S(p_1(t_0), p_2(t_0), \dots, p_N(t_0); p_1(t_F), \dots, p_N(t_F)) & \\ \equiv S(P_1, P_2, \dots, P_N) \end{aligned} \quad (13)$$

где: $u_1, u_2, \dots, u_M$ – множество управляющих воздействий, P_1, P_2, P_N – стратегии при различных шагах, t_0 – шаг по вершине графа, который соответствует ПТ, в которой находится судно в начальный момент времени прохождения узкости, t_F – шаг на котором достигнут минимум функционала.

Чтоб решить задачу безусловной оптимизации, на графе определяется вес $W_{\Theta(t)}$, который соответствует евклидовому расстоянию между всеми смежными путевыми вершинами графа:

$$W(i, j) = \sqrt{(\Delta \xi^2(i, j) + \Delta \eta^2(i, j))} \quad (14)$$

Присвоив $W(i, j) = u$ решается задача о поиске кратчайшего пути на графе. Решением является последовательность путевых точек, которая обеспечивает оптимальность с учётом ограничений (12). На рисунке 11 показан оптимальный путь на графе:

$$P_{\Theta(t)} = [p_{15} p_{13} p_{14} p_7 p_2 p_3 p_{16}] \quad (15)$$

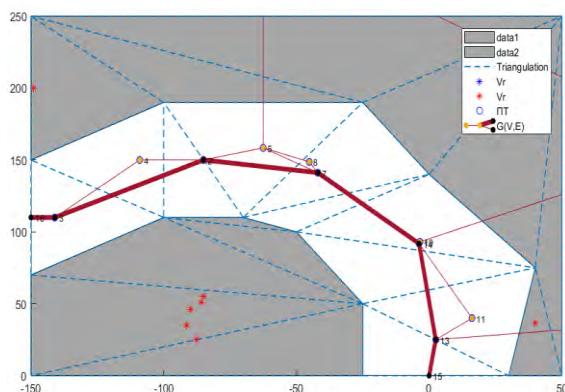


Рис. 11. Триангуляция области плавания судна. Оптимизация пути судна на графе Вороного.

Программное управление может быть осуществлено по одному из двух фундаментальных принципов. В практике судовождения используют два вида систем программного управления: системы с временной программой для судов, использующих инерциальные системы навигации, и системы с пространственной программой, при использовании СРНС для постоянного контроля за местоположением судна.

В данной статье продемонстрирован первый метод, где программа представляет из себя временной ряд, с интерполяцией методом нулевого порядка. Ключевым элементом при таком подходе является расчёт моментов времени $t_1, \dots, t_5$ – моментов начала перекладки руля, а t_d – период выхода на новый курс (рисунок 12). $\theta(t)$ представляет из себя временную диаграмму с интерполяцией методом нулевого порядка.

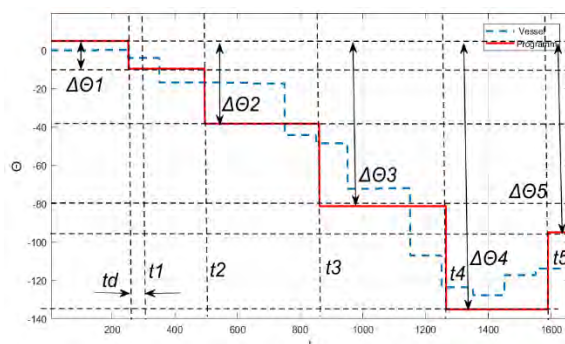


Рис. 12 Программа управления курсом судна. Заданная человеком – синяя, выработанная автоматически – красная.

В качестве программы ГД используется программа, представленная на рисунке 6.

Управление по программной траектории

Функциональные возможности и технико-экономические показатели робототехнических комплексов (РТК) в значительной степени определяются тем, какие принципы и алгоритмы реализуются в их системе управления. [13]

Для формализованного описания методов программного и адаптивного управления вводится в рассмотрение обобщенная динамическая модель РТК. Эта модель включает систему уравнений динамики, описывающих управляемые движения

роботов и оборудования, входящего в состав РТК, а также систему конструкционных ограничений и внешних условий. В общем случае систему уравнений динамики РТК можно записать в виде векторного дифференциального уравнения:

$$\dot{x} = F(x, u, \chi) + \pi, \quad t \in [t_0, t_T] \quad (16)$$

где: $x=x(t)$ – n -мерный вектор состояний РТК; $u=u(t)$ – m -мерный вектор управлений, подаваемых на приводы РТК; $\chi=\chi(t)$ – p -мерный вектор параметров исполнительных механизмов и приводов; $\pi=\pi(t)$ – n -мерный вектор внешних возмущений; t – текущее время; F – заданная n -мерная вектор-функция, зависящая от конструкционных особенностей РТК. [13]

Задачей управления АННА является самонаведение на целевую ПТ в автономном режиме.

Тогда цель самонаведения формулируется, как:

$$\|x(t_T) - x_1\| \leq e, \quad e = e(t) = \theta(t) - \theta_0(t). \quad (17)$$

где: e – ошибка управления без временных ограничений самонаведения.

В судовождении такие задачи решаются с помощью различных регуляторов. В исследованиях [1, 8] такая задача решается с помощью модельно-предиктивного регулятора (MPC), основанного на прогнозировании поведения математической модели объекта управления и выработке оптимального управляющего сигнала. В научных трудах [4, 7, 10] такая задача решается с помощью традиционных контроллеров на основе ПИД законов управления. В качестве альтернативы ПИД-регулятора может быть применён контроллер на основе методов искусственного интеллекта: нейронных сетей или нечёткой логики.

В данном исследовании, для обеспечения управления судна по заданной траектории, применён ПИД-регулятор, который выполняет функцию авторулевого устройства. В дискретном виде – это усилитель передаточной функцией $C(s)$ от ошибки e :

$$C(s) = K + \frac{K_1}{s} + \frac{K_D s}{T_D s + 1} \quad (18)$$

где: s – безразмерное время, K – коэффициент пропорциональности, K_1 – коэффициент усиления интегральной составляющей ошибки, K_D – коэффициент усиления дифференциальной составляющей ошибки, T_D – малая постоянная времени. [6, 7, 10]

Коэффициенты подобраны с помощью автоматизированных средств настройки ПИД-регуляторов методом Зиглера-Никольса.

Моделирование плавания по программной траектории

На основании модели АННА и выработанной программы движения судна выполняется серия экспериментов для оценки качества управления.

В действительных условиях, на судно действуют гидрометеорологические условия, которые выражаются в угле сноса судна от заданного курса. Угол сноса задан методом Монте-Карло $\epsilon \approx N(\mu, \sigma)$.

Результаты моделирования автоматического управления судна по заданной программе представлены на рисунках 13 – 15.

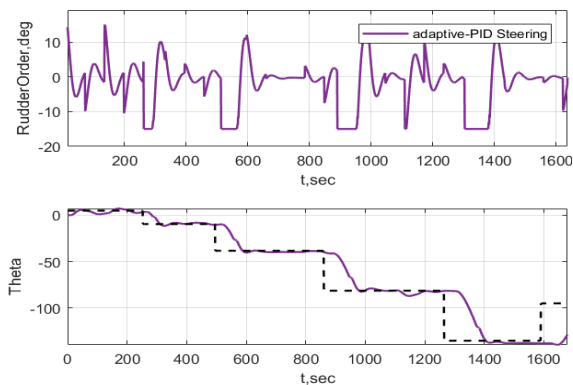


Рис 13. Управление по программной траектории.
 $\mu_C = 1,5^\circ$, ограничение на перекладку руля: $\delta_{min} = -15^\circ$; $\delta_{max} = 15^\circ$

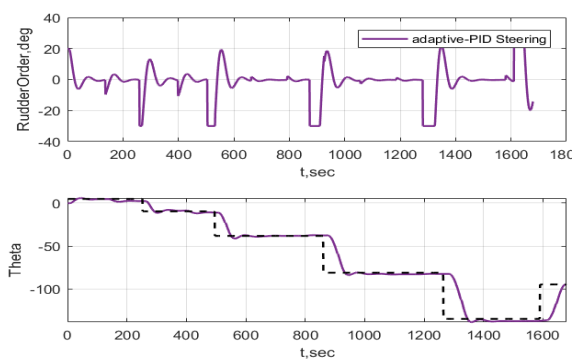


Рис 14. Управление по программной траектории.
 $\mu_C = 3^\circ$, ограничение на перекладку руля: $\delta_{min} = -30^\circ$; $\delta_{max} = 30^\circ$

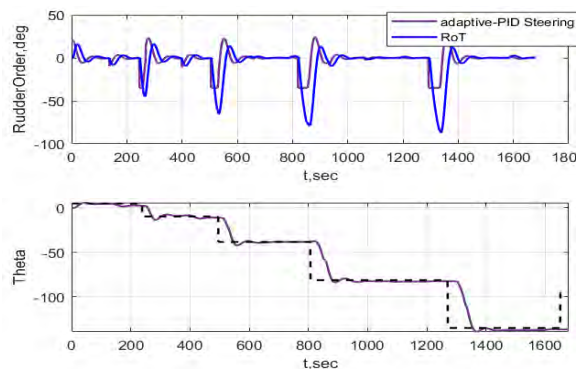


Рис 15. Управление по программной траектории.
 $\mu_C = 3^\circ$, ограничение на перекладку руля: $\delta_{min} = -35^\circ$; $\delta_{max} = 35^\circ$

На рисунках 13 – 15 видно, что при изменении предельного-допустимого значения угла перекладки руля и оптимальной настройки ПИД-регулятора можно достигнуть минимизации количества перекладок, более устойчивого движения на заданном курсе, что в свою очередь может повысить безопасность судна путём минимизации нагрузки на органы управления.

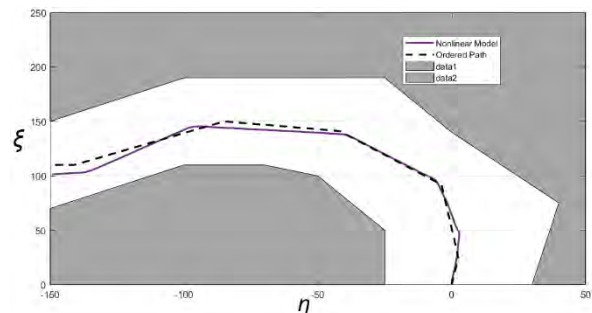


Рис. 16 Моделирование траектории движения АННА по программной траектории.

Заключение

Как видно из результатов моделирования движения АННА по траектории (рисунок 16), есть некоторая ошибка, при выходе на новый курс. Это связано с ошибкой идентификации модели и прогнозирования моментов выхода в точку начала поворота. Данный недостаток может быть устранён путём использования пространственной программы управления, которая подразумевает использование систем позиционирования.

В исследовании также применены современные методы построения динамической модели АННА на основе синтеза нелинейных моделей (NLARX) и линейных моделей пространства состояний. Идентификатором нелинейности в первом случае служит нейронная сеть.

Автоматическая программная траектория вырабатывается с помощью комбинированных методов дискретной оптимизации на графах и знаний маневренных элементов судна-прототипа.

Дальнейшие исследования лежат в области разработки, построения и исполнения программ движения для расхождения АННА с множеством динамических опасностей, при плавании в стеснённых водах.

Рассмотренная модель может служить для создания автономных судов, способных автоматически вырабатывать программу управления и следовать по программной траектории движения.

Литература

1. Васьков А.С., Штанько А.Н. Адаптивная модель движения судна в системах управления, Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1, С. 288—295.
2. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л., Судостроение, 360 с., 1988.
3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн, Г.; Корн, Т.; Изд-во: М.: Наука, 1978 г.
4. Липко И.Ю., Титов А.В. Онлайн прогноз времени присутствия АНПА в заданном положении при его наведении на цель с помощью а-профилей, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 254—260.

5. МIRONENKO A. A. «Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна: дис. докт. техн. наук : 05.22.19. МIRONENKO Александр Анатольевич. – М., 2016. – 310 с.
6. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л., Судостроение, с.478, 1976.
7. Саранчин, А. И. Системы автоматического управления в навигационных приборах: учеб. пособие. А. И. Саранчин, В. В. Завьялов. Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2011. – 76 с.
8. Штанько, А. Н. Идентификация и адаптация процессов управления маневрами судна. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. (2.9.7) – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2023. – 125 с.
9. Филатов В.И. Технология интеллектуального анализа и синтеза для решения комплекса задач оптимизации рейса морского судна. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. (2.9.7) – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2023. – 169 с.
10. Якушников А.А. Автоматизация судовождения. К.Н. Денисов, В.Т. Кондрашихин., А.П. Ющенко. Изд-во «Транспорт», 364 с.1967.
11. Lennart Ljung. System Identification Toolbox for Use with MATLAB User's Guide. The MathWorks, Inc. Mail 24 Prime Park Way Natick, 274 p., 1997.
12. Qinghua Zhang. Multiple step prediction with nonlinear ARX models. Qinghua Zhang, Lennart Ljung. IFAC Nonlinear Control Systems, Stuttgart, Germany, p.309-314., 2004.
13. Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. — 332 с.: ил.

References

1. Anatoliy S. Vas'kov, Aleksandr N. Shtanko, Adaptive model of vessel movement in control systems, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 288—295.
2. Gofman A.D. Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovanie sudna [Propulsion-steering complex of Ship's maneuvering]. Spravochnik. L., Sudostroenie, 360 s., 1988.
3. Korn, G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Encyclopedia for scientific staff and engineers]. Korn, G.; Korn, T.; Izd-vo: M.: Nauka, 1978 g.
4. Ivan U. Lipko, AUV time presence online estimation with a-profiles in the course keeping problem, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 254—260.
5. MIRONENKO A. A. Metodologija formalizacii navigacionnoj obstanovki, planirovanija marshruta i programnyh traektorij dvizhenija sudna [Methodology of formalization navigational outer condition, ship's route planning and program trajectories of ship's maneuvering passages]., Dis. dokt. tehn. nauk : 05.22.19. MIRONENKO Aleksandr Anatol'evich. – M., 2016. – 310 s.
6. Sobolev G.V. Upravljaemost' korablja i avtomatizacija sudovozhdenija [Ship's maneuverability and navigation automatization]. L., Sudostroenie, s.478, 1976.
7. Saranchin, A. I. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija v navigacionnyh priborah [Automatic control systems in navigational technical aids]. A. I. Saranchin, V. V. Zav'jalov. Vladivostok : Mor. gos. un-t, 2011. – 76 s.
8. Shtan'ko, A. N. Identifikacija i adaptacija processov upravlenija manevrami sudna [Identification and adaptation the processes of vessel's maneuvering management]. Diss. na soisk. uch. st. k.t.n. (2.9.7) – Novorossijsk: GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2023. – 125 s.
9. Filatov V.I. Tehnologija intellektual'nogo analiza i sinteza dlja reshenija kompleksa zadach optimizacii rejsa morskogo sudna [Intellectual analysis and synthesis technology for solvation of ship's route optimization problem]. Diss. na soisk. uch. st. k.t.n. (2.9.7) – Novorossijsk: GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2023. – 169 c.
10. Jakushenkov A.A. Avtomatizacija sudovozhdenija [Automatization of ship's Navigation]. K.N. Denisov, V.T. Kondrashihin., A.P. Jushhenko. Izd-vo «Transport», 364 s.1967.
11. Lennart Ljung. System Identification Toolbox for Use with MATLAB User's Guide. The MathWorks, Inc. Mail 24 Prime Park Way Natick, 274 p., 1997.
12. Qinghua Zhang. Multiple step prediction with nonlinear ARX models. Qinghua Zhang, Lennart Ljung. IFAC Nonlinear Control Systems, Stuttgart, Germany, p.309-314., 2004.
13. Timofeev A. V. Adaptivnye robototekhnicheskie kompliksi [Adaptive Robotic technical complexes]. — L.: Mashinostrojenie. Leningr. otd-nie, 1988. — 332 s.: il.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Филатов Виктор Иванович, кандидат технических наук, научный сотрудник, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Viktor I. Filatov, Ph.D. (Eng.), scientific staff, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Астреин Вадим Викторович, доктор технических наук, капитан дальнего плавания, профессор кафедры «Судовождение», государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Vadim V. Astrein, Dr. Sci. (Eng), Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 29.10.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 26.10.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 10.11.2023.



**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 в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены 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 в WORD.

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 16500 рублей по выставяемому 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**

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**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**