

4 Hz | 86 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101 ISSN 2073-7173 (print)
1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010 ISSN 2588-0233 (on line)
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010101000011100110010011100010110100100100
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



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



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE



№ 4 Том 4 2021
№ 4 Part 4 2021

Morskie intelektual 'nye tehnologii



**Труды
IX МЕЖДУНАРОДНОГО
БАЛТИЙСКОГО МОРСКОГО ФОРУМА**
Proceedings IX International Baltic Maritime Forum



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 том 4 2021 Сквозной номер 54

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

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

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

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008,

Эл № ФС72-33245 от 19.09.2008 выданы Роскомнадзором.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

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

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

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

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

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

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

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

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



**Калининградский государственный технический
университет**

**Труды
IX Международного
Балтийского морского форума**



51

**центральный
конструкторско - технологический
институт судоремонта**

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Ю.И. Нечаева.....	13
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Притыкин А.И. Несущая способность бортового перекрытия с двумя стрингерами при ледовой нагрузке.....	15
Притыкин А.И. Анализ частот колебаний балок с регулярно расположенными вырезами.....	22
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Дятченко С.В., Лукьянова О.С. Определение основных элементов и характеристик тунцеловного судна на ранних стадиях его проектирования.....	29
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Белей В.Ф., Решетников Г.А., Коротких К.В. Исследование высших гармонических составляющих напряжения и тока и их влияния на функционирование судового электрооборудования.....	34
Синявский Н.Я., Иванов А.М., Кострикова Н.А. Анализ частиц продуктов износа в отработанных судовых моторных маслах.....	44
Ковальчук Л.И., Бураковская М.В. Теоретическая оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрической втулки судового дизеля от воздействия переменных подвижных газовых нагрузок.....	49
Равин А.А., Хруцкий О.В. Стенд для динамических испытаний методов вибродиагностики компрессорных лопаток.....	54
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	
Кажекин И.Е., Финько С.П., Харитонов М.С. Влияние нелинейной нагрузки на ток однофазного замыкания в судовых электросетях.....	59
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Кивчун О.Р. Метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе учёта добавочного ресурса.....	65
Огий О.Г., Осипов В.Ю., Тристанов А.Б., Жукова Н.А. Задачи и показатели эффективности интеллектуальной нейросетевой поддержки решений по управлению трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса (на английском языке).....	73
Ермаков С.В., Моисеев П.А. Использование глобальной интегрированной информационной системы ИМО для исследования суточного распределения навигационных аварий.....	80
Никишин А.Ю., Харитонов М.С., Зубавичюс Р.В. Накопитель электроэнергии как средство регулирования электропотребления морского порта.....	87
Кивчун О.Р., Гнатюк В.И. Методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса.....	94
Харитонов М.С., Кугучева Д.К. Оценка потенциала солнечной энергетики на объектах порта Калининград.....	99
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ	
Поляков Р.К. Разработка и обоснование структуры прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения.....	106
УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	
Луценко Д.В., Сапко А.В., Крюков И.Н. Модель неоднородных потоков событий на основе игры в размещение ранговых автоматов.....	113
Минько В.М. Об управлении безопасностью промыслового оборудования и технологий лова на морских рыболовных судах.....	118
Яфасов А.Я., Майтаков Ф.Г., Костенко Л.В. Концепция экосистемы рыбохозяйственного комплекса России.....	124
Мнацаканян А.Г., Карлов А.М., Харин А.Г. Метод оценки экономической доступности рыбных продуктов в контексте обеспечения продовольственной безопасности.....	135

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

Наумов В.А., Великанов Н.Л., Тришина А.В. Гидравлический расчет системы пожаротушения портовых сооружений..... 141

Фадеев А.В. Моделирование процесса воздействия ударной волны на объекты портовой инфраструктуры..... 146

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Великанов Н.Л., Шарков О.В. Математическая модель для определения угла крена рыболовного судна при выборке кошелькового невода..... 153

Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Власова К.В. Подход к оценке взаимных сопротивлений вибраторов в конструкции логопериодической антенны двойной поляризации..... 158

Медведев В.В., Еремичева В.Е., Колин А.Д. Численное моделирование сильного воздействия на ионосферную плазму..... 165

CONTENTS	page
To memory of Yuriy Nechayev.....	13
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Alexej I. Pritykin Load capacity of the board grillage with two stringers under ice loading.....	15
Alexej I. Pritykin Analysis of vibration of beams with regularly located openings.....	22
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Seergey V. Dyachenko, Olga O. Lukyanova Determination of the main elements and characteristics of a tuna vessel in the early stages of its design.....	29
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Valeriy F. Beley, Gleb A. Reshetnikov, Kirill V. Korotkikh Research of higher harmonic components of voltage and current and their influence on the functioning of shipboard electrical equipment.....	34
Nikolai Ya. Sinyavsky, Andrei M. Ivanov, Natalya A. Kostrikova Analysis of wear particles in used marine engine oils.....	44
Leonid I. Kovalchuk Marina V. Burakovskaya Theoretical assessment of the stress-strain state of the cylinder sleeve of a marine diesel engine from the effects of variable moving gas loads.....	49
Alexander A. Ravin, Oleg V. Khrutsky Stand for dynamic tests of methods vibration diagnostics of compressor blades.....	54
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Ilya E. Kazhekin, Sergey P. Finko, Maxim S. Kharitonov Influence of nonlinear load on single-phase current in ship power networks.....	59
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Oleg R. Kivchun Method of power consumption management objects of the regional electrotechnical complex on the basis of accounting for the additional resource.....	65
Oksana G. Ogij, Vasiliy Y. Osipov, Alexander B. Tristanov, Natalia A. Zhukova Tasks and performance indicators of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex (in English).....	73
Sergey V. Ermakov, Pavel A. Moiseev Use of the IMO Global Integrated Shipping Information System to study the daily distribution of navigation accidents.....	80
Andrey Y. Nikishin, Maxim S. Kharitonov, Roman V. Zubavichius Electrical storage systems as a tool for power consumption regulation of the marine port.....	87
Oleg R. Kivchun, Victor I. Gnatyuk. Methodology for determining the Z2-energy saving potential objects of the regional electrotechnical complex.....	94
Maxim S. Kharitonov, Darya K. Kugucheva Assessment of solar energy potential at the facilities of the port of Kaliningrad.....	99
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Ruslan K. Polyakov Development and substantiation of the structure of a prototype of a self-learning hardware and software complex for technical vision.....	106
CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS	
Lutsenko D. Vladimirovich, Sapko A. Viktorovich, Kryukov I. Nikitovich Model of heterogeneous streams of events built on the game of placing rank automata.....	113
Victor M. Minko On the safety management of fishing equipment and fishing technologies on sea fishing vessels.....	118
Abdurashid Ya. Yafasov, Fedor G. Maitakov, Ludmila V. Kostenko The concept of the ecosystem of the Russian fisheries complex.....	124
Albert G. Mnatsakanyan, Anatolij M. Karlov, Alexander G. Kharin Method of assessing the economic availability of fish products to ensure food security	135
FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE	
Vladimir A. Naumov, Nikolay L. Velikanov, Anzhelika V. Trishina Hydraulic calculation of the fire extinguishing system of port facilities.....	141

Andrey V. Fadeev Modeling of the impact of a shock wave on port infrastructure facilities.....	146
MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS	
Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov Mathematical model for determining the roll angle of a fishing vessel when purse seine sampling.....	153
Elena V. Volkhonskaya, Evgeniy V. Korotey, Ksenia V. Vlasova. An approach to the evaluation of mutual resistances of vibrators in the construction of a logoperiodic antenna of double polarization.....	158
Vladimir V. Medvedev, Viktorija E. Eremicheva, Anton D. Kolin Numerical modeling of strong effects on ionospheric plasma.....	165



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

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

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

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

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

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

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

Почетный академик Российской Академии Естественных Наук (2003)

Рыцарь науки и искусств (Россия, Япония, 2004)

Выдающийся ученый XXI века (Кембридж, Великобритания, 2007)

Заслуженный деятель науки РФ (2007)

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

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

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

Медаль имени Альберта Эйнштейна (США, 2011)

Почетный доктор Калининградского государственного технического университета (2012)

Медаль имени Исаака Ньютона (Великобритания, 2013)

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

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

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

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.015.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.001>

Несущая способность бортового перекрытия с двумя стрингерами при ледовой нагрузке

А.И. Притыкин¹ e-mail: prit_alex@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Снизить повреждаемость бортовых перекрытий при ледовых нагрузках можно за счет совершенствования расчетных зависимостей по оценке их несущей способности. Далеко не всегда такие зависимости, приводимые в справочных изданиях, дают верные рекомендации из-за не вполне ясного характера распределения нагрузок в сложных статически неопределимых системах. В справочнике по СМК приводится расчетная зависимость, позволяющая определить несущую способность регулярного перекрытия с двумя стрингерами при действии локально распределенной нагрузки в пределах прямоугольника. Цель данной работы заключалась в оценке несущей способности реального бортового перекрытия ледокола типа *Wind* с помощью МКЭ при параметрах ледовой нагрузки, определяемой рекомендациями Морского Регистра РФ, и последующем сравнении полученных результатов с расчетами по теоретической зависимости, приведенной в справочнике. Полученные данные показали, что зависимость в справочнике для оценки несущей способности перекрытия дает удовлетворительно согласующиеся с МКЭ результаты после соответствующего уменьшения числового коэффициента в ней. При анализе несущей способности перекрытия варьировались шпация, толщина обшивки, высота стенок стрингеров и площадь приложения нагрузки. Установлено, что текучесть наблюдается в опорных сечениях шпангоутов и посередине их пролета, а из-за большой ширины присоединенного пояса обшивка у контура перекрытия практически никогда не течет. Полученные МКЭ результаты показали наличие обратно пропорциональной зависимости между предельной нагрузкой и шпацией при фиксированной площади нагружения. Отмечено, что увеличение толщины обшивки несущественно влияет на величину предельной нагрузки при остальных неизменных параметрах перекрытия. Выполненные расчеты позволяют кроме предельной нагрузки оценить также и величины прогибов при упругопластическом деформировании перекрытий, которые затруднительно подсчитать аналитически.

Ключевые слова: перекрытие, одинарный борт, стрингеры, напряжения по Мизесу, несущая способность, ледовая нагрузка, аналитическая зависимость, МКЭ

Load capacity of the board grillage with two stringers under ice loading

Alexej I. Pritykin¹ e-mail: prit_alex@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. To low damage of the board grillages under ice loading is possible by improving analytical relations on estimation of their load capacity. Not always such relations, bringing in manuals, give true recommendations because of complex character of the loads distribution in static indeterminate systems. In manual on ship structural mechanics is giving analytical relation for determination of load capacity of regular grillage with two stringers under action of locally distributed load in rectangular area. Purpose of this study is to estimate load capacity of real board grillage of icebreaker of type *Wind* with help of FEM under parameters of ice load recommended in Maritime Register of RF, and following comparison of obtained results with calculation on analytical relation, given in manual. Obtained results show that relation in manual for estimation of load capacity of grillage give satisfactory results corresponding to FEM only after corresponding reducing of numerical coefficient in it. Under analysis of load capacity of grillage, it was changing frame space, thickness of plating, depth of stringers and area of application of load. It was estimated that most loaded zones of frames are their sections near supports and in the mid-span. Because of big width of associated plate the plating near contour of grillage is never yielding practically. Results obtained by FEM show existence of inversely proportional relation between the limit load and space framing under fixed area of loading. It was noticed that increasing of the plating thickness influent not essentially on value of the limit load under all other parameters of grillage unchangeable. Performed calculations allow to estimate limit load and value of deflections under elasto-plastic deformation of grillage, which is difficult to calculate analytically.

Key words: grillage, single board, stringers, von Mises stress, load capacity, ice load, analytical relation, FEM

Введение

Повреждения бортовых конструкций судов, эксплуатирующихся в северных широтах, в большинстве случаев являются следствием действия интенсивных локально распределенных ледовых нагрузок. Для снижения числа повреждений проводятся, с одной стороны, исследования по уточнению величин ледовых нагрузок [1-4], а с другой - по аналитической оценке прочности бортовых перекрытий [5- 10]. Аналитическое описание упругопластического деформирования и

предельного состояния судовых перекрытий связано со значительными математическими трудностями, обусловленными наличием физической и геометрической нелинейностей. Поэтому при получении тех или иных зависимостей принимается ряд допущений, которые не всегда соответствуют действительности. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния перекрытий особенно в упругопластической стадии нагружения – достаточно затратно. Наиболее эффективным является получение предельной нагрузки перекрытий для сложных конструктивных схем и способов

нагружения на основании численных алгоритмов, среди которых особое место занимает метод конечных элементов, реализованный, например, в программном комплексе ANSYS. Данные, полученные МКЭ, помогут дальнейшему развитию аналитических методов, которые гораздо удобнее для инженерных расчетов чем численные методы.

Опыт эксплуатации судов и теоретические исследования явились основой для разработки требований Морского Регистра РФ [9], определяющих величину и зону приложения ледовой нагрузки в зависимости от водоизмещения судна и его ледового класса.

Целью данной работы была оценка несущей способности реального бортового перекрытия ледокола типа *Wind* [2] с помощью МКЭ и сопоставление ее с результатами расчета по теоретической зависимости, приведенной в справочнике по СМК [7]. Полученные предельные нагрузки при этом сравнивались с рекомендациями Морского Регистра РФ для разного ледового класса судна.

1. Конструкция и характер нагружения бортового перекрытия

Рассмотрим вариант реального бортового перекрытия ледокола *Wind*, у которого поперечная система набора - наиболее рациональная для бортовых перекрытий судов ледового плавания. Между нижней палубой и двойным дном в средней части судна идут два стрингера, расстояние между которыми составляет $a_s = 1200 \text{ мм}$. Длина отсека между поперечными переборками определяет длину перекрытия $L = 9.6 \text{ м}$. Шпация в средней части $a = 800 \text{ мм}$. Остальные размеры перекрытия таковы: толщина обшивки $t_b = 30 \text{ мм}$, стенка шпангоута $h_w - t_w = 250 \text{ мм} - 14 \text{ мм}$; поясok шпангоута $b_f - t_f = 90 \text{ мм} - 14 \text{ мм}$; стенка стрингера $h_s - t_s = 650 \text{ мм} - 12 \text{ мм}$; поясok стрингера $b_s - t_s = 200 \text{ мм} - 15 \text{ мм}$. Ширина перекрытия $l = 3.6 \text{ м}$. Данные взяты из работы [2].

В книге Н.В. Барабанова [2] отмечается, что канадская практика проектирования предполагает, что зона ледовой нагрузки по высоте, не превышающая 0.9 м, подходит к большинству неблагоприятных случаев нагружения. Величина максимальной ледовой нагрузки ограничивается предельной прочностью льда при сжатии, изгибе и сдвиге, однако его механические характеристики могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от условий образования и сил, действующих на ледовые поля. Практика эксплуатации судов в ледовых условиях показывает, что реальные нагрузки значительно меньше тех, которые соответствуют разрушению льда [2].

В Морском Регистре РФ [10] условная ледовая нагрузка определяется тремя параметрами: давлением p , длиной l'' и высотой b её распределения. В районе VI расчётное ледовое давление определяется по формуле

$$p_{VI} = 1200 a_3 \sqrt[6]{\Delta / 1000} \text{ [кПа]}, \quad (1)$$

где a_3 – коэффициент, определяемый по таблице 3.10.3.2.1 [9] в зависимости от ледового класса; Δ – водоизмещение по летнюю грузовую ватерлинию, т.

Высота распределения ледовой нагрузки

$$b_B = C_3 C_4 k_\Delta \text{ [м]}, \quad (2)$$

где C_3 – коэффициент, определяемый по таблице

3.10.3.3.1 зависимости от ледового класса; C_4 –

коэффициент, принимаемый в зависимости от угла наклона борта к вертикали. При наклоне меньше 6°

$C_4 = 1$; $k_\Delta = \sqrt[3]{\Delta / 1000}$, но не более 3.5.

Длина распределения ледовой нагрузки

$$l_B'' = 6 b_B \text{ [м]}, \quad (3)$$

но не менее $3 \sqrt{k_\Delta}$.

Для ледокола типа *Wind* водоизмещением $\Delta = 6500 \text{ м}^3$, если бы он строился на ледовый класс Arc4, имеем из [10] $a_3 = 0.5$ и $C_3 = 0.34$. Тогда по (1)

- (3) получим

$$p_{VI} = 1200 \cdot 0.5 \sqrt[6]{6500 / 1000} = 820 \text{ кПа}; \quad (4)$$

$$b_B = 0.34 \sqrt[3]{6500 / 1000} = 0.635 \text{ м}; \quad l_B = 6 \cdot 0.635 = 3.81 \text{ м} \quad (5)$$

При оценке прочности бортовых конструкций МКЭ в качестве эквивалентных напряжений, вызывающих текучесть материала, принимались напряжения по Мизесу при пределе текучести материала $R_{eff} = 240 \text{ Н / мм}^2$. Расчетная нагрузка на бортовое перекрытие прикладывалась в пределах прямоугольной зоны со сторонами, определяемыми по (5).

Согласно Морскому Регистру РФ [10] толщина обшивки борта в районе усиления должна быть не менее (3.10.4.1)

$$s \geq 0.75 T u + \frac{15.8 a}{1 + 0.5 a / c} \sqrt{p_{VI} / R_{eff}}; \text{ [мм]}, \quad (6)$$

где T – планируемый срок службы, за который можно принять $T = 24$ года.; u – средний износ связи за год, мм/г, (для судов ледового класса Arc4 $u = 0.26 \text{ мм / год}$ (табл. 3.10.4.1); a – шпация набора, м; $c = b_B$ при поперечной системе набора;

p_{VI} – ледовое давление в районе VI, кПа.

В данном случае получим

$$s \geq 0.75 \cdot 24 \cdot 0.26 + \frac{15.8 \cdot 0.8}{1 + 0.5 \cdot 0.8 / 0.635} \sqrt{820 / 240} = 19 \text{ мм} \quad (7)$$

Таким образом, фактическая толщина бортовой обшивки $s = 30$ мм удовлетворяет требованию (7) Морского Регистра.

Перекрытие нагружалось равномерно распределенной нагрузкой, действующей в пределах прямоугольной полосы, обусловленной площадью ледяного поля $l_B * b_B = 3.81 \text{ м} * 0.635 \text{ м}$.

2. Аналитический расчет

Аналитическая зависимость для предельной нагрузки p_y регулярного перекрытия (рис.1а) с

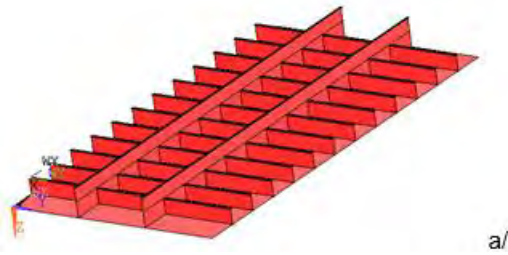
вариантом симметричного нагружения равномерно распределенной нагрузкой на малом участке прямоугольной формы (рис.1б), полученная Л.М. Беленьким, содержится в справочнике по СМК [7] и имеет довольно компактный вид

$$p_y = \frac{k_y M_y^f}{a l^2 \beta (2 - \beta)} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{32 M_y^s l}{3 \mu a M_y^f}} \right), \quad (8)$$

где M_y^f - предельный момент сечения шпангоута;

M_y^s - предельный момент сечения стрингера;

$\mu = l_B / a$; a - шпация; $\beta = b_B / l_B$; l_B и b_B - длина и ширина зоны приложения нагрузки



соответственно; l - ширина перекрытия; k_y - числовой коэффициент, который в [6] принят равным $k_y = 8$.

При выводе (8) подразумевалось, что жестко заделанное по контуру перекрытие имеет два стрингера, расположенных на расстоянии $l/3$ друг от друга, а пластические моменты M_y^f при предельной нагрузке p_y образуются как в опорных сечениях нагруженных шпангоутов, так и в узлах их пересечения со стрингерами.

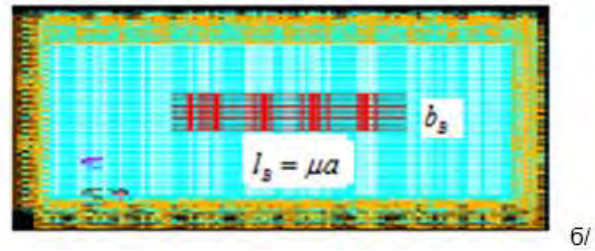


Рис. 1. Бортовое перекрытие: а/ конструкция; б/ характер нагружения

Предельный момент сечения шпангоута вычисляется как

$$M_y^f = R_{eH} W_y^f, \quad (9)$$

где W_y^f - предельный момент сопротивления, определяемый как

$$W_y^f = S_f^+ + S_f^-, \quad (10)$$

где S_f^+ и S_f^- - статические моменты соответственно растянутой и сжатой частей площади сечения относительно центральной оси.

Аналогично зависимости (9) вычисляется и предельный момент сечения стрингера M_y^s , только производится замена индексов f на s .

Для расчета по зависимости (9) надо определить величину W_y , вычислив предварительно положение центра тяжести сечения. В случае одинарного борта для профиля балки несимметричного по высоте двутавра ордината y_c его центра тяжести относительно оси присоединенного пояса определится как

$$y_c = h_w (b_f t_f + 0.5 h_w t_w) / (b_f t_f + h_w t_w + b_d t_d). \quad (11)$$

Тогда предельный момент сечения принимает вид

$$W_y = b_f t_f (h_w - y_c) + 0.5 t_w (h_w - y_c)^2 + 0.5 t_w y_c^2 + b_d t_d y_c. \quad (12)$$

Из (12) как частные случаи можно получить выражения W_y для симметричного двутавра при

$b_f = b_d$; $t_f = t_d$; $y_c = h_w / 2$ и для двутавра с достаточно большим пояском при $b_d \rightarrow \infty$ и $y_c = 0$.

Для оценки корректности зависимости (8) были произведены расчеты предельных нагрузок p_y

нескольких вариантов нагружения перекрытия и сопоставлены с результатами расчетов МКЭ.

При размерах сечения шпангоута 800 - 30 - 250 - 14 - 90 - 14 мм величина $W_y^f = 1265 \text{ см}^3$, а размерам стрингера 1200 - 30 - 650 - 12 - 200 - 15 мм соответствует значение $W_y^s = 7010 \text{ см}^3$. Для варианта нагружения в

пределах прямоугольника $l_B * b_B = 3.81 \text{ м} * 0.635 \text{ м}$ подстановка полученных значений в (8) приводит к величине предельной нагрузки перекрытия $p_y^{теор} = 6.22 \text{ МПа}$. Расчет МКЭ дает значение $p_y^{МКЭ} = 1.85 \text{ МПа}$ (рис.2а). Разница огромная, но

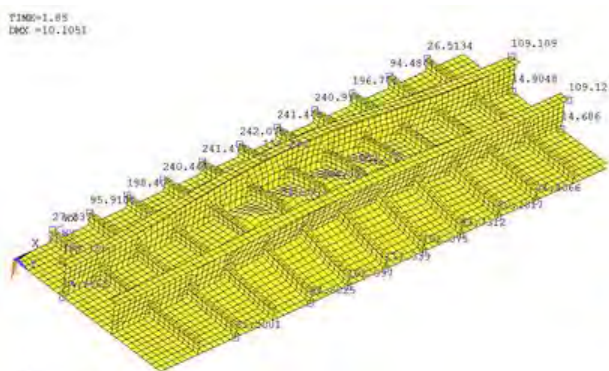
здесь надо иметь в виду, что зависимость (8) подразумевает полную текучесть балок в опорных сечениях и в узлах пересечения стрингеров со шпангоутами, а расчет МКЭ приводит к полной текучести только свободных поясков и лишь к частичной текучести шпангоутов по высоте. Добиться текучести обшивки при линейном характере упрочнения практически невозможно. Для соответствия результатов по (8) расчетам МКЭ целесообразно заменить коэффициент $k_y = 8$ в зависимости (8) на $k_y = 2.34$. В этом случае расчет по (8) приведет к величине $p_y^{теор} = 1.82 \text{ МПа}$, дающей расхождение с МКЭ $\delta = 1.6\%$. Проверим приемлемость теоретического решения (8) при варьировании различных параметров перекрытия, сопоставив с результатами расчета МКЭ.

3. Расчеты МКЭ

Все рассматриваемые перекрытия регулярные, т. е. с одинаковыми шпангоутами и одинаковыми заделками на опорах. При известной длине перекрытия и числе шпангоутов n шпация

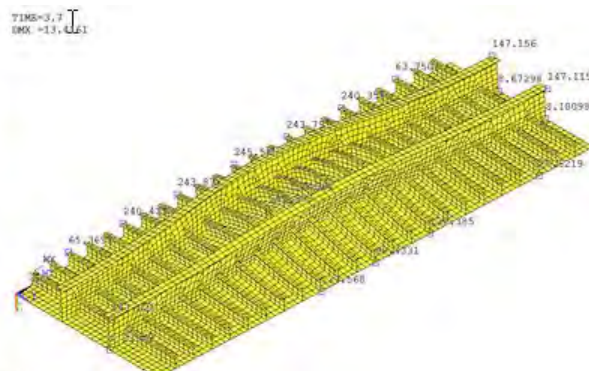
определялась как $a = L / (n + 1)$, а расстояние между стрингерами как $a_s = l / (m + 1)$.

Расчет МКЭ с помощью комплекса ANSYS проводился для бортового перекрытия (рис.1а), жестко заделанного по контуру и нагруженного равномерно распределенной нагрузкой p_y , имитирующей ледовую нагрузку по площади прямоугольника, как показано на рис.1б. Использовались четырехугольные элементы Shell63 с шестью степенями свободы в каждом узле. Размеры элементов зависели от высоты стрингеров и принимались равными $\Delta_{КЭ} \approx 0.16h_w$. Материал рассматривался как упругопластический с линейным упрочнением. Модуль Юнга принимался равным $E = 210 ГПа$, а секущий модуль $E_t = 0.01E$.



а/ $a = 800 \text{ мм}$

Рис.2. Напряженное состояние перекрытия при разных шпациях: а/шпация $a = 800 \text{ мм}$; б/ $a = 400 \text{ мм}$



б/ $a = 400 \text{ мм}$

Уменьшение предельной нагрузки с увеличением шпации связано с тем, что при постоянной длине нагрузки l_B и возрастающей шпации нагружается меньшее число шпангоутов, в результате чего нагрузка снижается.

Влияние размеров стрингеров

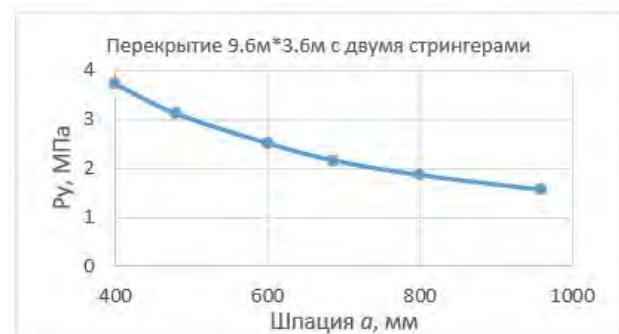
Посмотрим, как влияют размеры стрингеров на p_y , если оставить неизменными размеры шпангоутов, а изме-

Влияние шпации

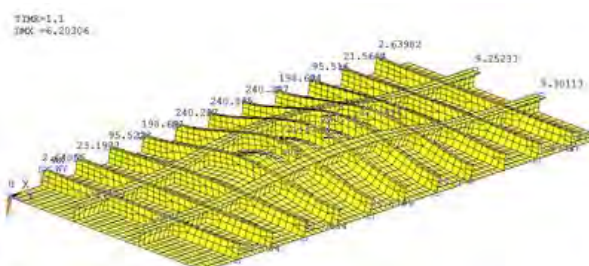
Варьирование размеров шпации в пределах $400 \text{ мм} \leq a \leq 960 \text{ мм}$ показало, что расчет перекрытия $9.6 \text{ м} \times 3.6 \text{ м}$ при нагружении его по площади $3.81 \text{ м} \times 0.635 \text{ м}$ при величине $a = 800 \text{ мм}$ дает предельную нагрузку $p_y^{МКЭ} = 1.85 \text{ МПа}$ (рис.2а).

Отметим, что полученная предельная нагрузка существенно превосходит расчётное ледовое давление $p_{Bl} = 0.82 \text{ МПа}$, определяемое Морским Регистром согласно (4) для класса Arc4.

Уменьшение шпации в 2 раза до $a = 400 \text{ мм}$ дает двукратное увеличение p_y до значения $p_y^{МКЭ} = 3.7 \text{ МПа}$ (рис.2б). В целом, изменение шпации приводит к обратно пропорциональному изменению предельной нагрузки (рис.3а). Причем данные по (8) и МКЭ указывают на расхождение, не превышающее 3%.



а/



б/

Рис.3. Перекрытие ледокола Wind: а/ зависимость нагрузки p_y перекрытия от шпации a ; б/ напряжения в перекрытии со стрингерами, равными по высоте шпангоутам $h_s = h_f = 250 \text{ мм}$

Влияние толщины обшивки

Проверим применимость зависимости (8) для перекрытия ледокола *Wind* при толщине обшивки $t_d = 19\text{ мм}$, как это требует Регистр для судов ледового класса Arc4. Для нагрузки, распределенной по площади $l_B * b_B = 3.81\text{ м} * 0.635\text{ м}$, по (8) получим $p_y^{meop} = 1.66\text{ МПа}$, а расчет МКЭ дает $p_y^{МКЭ} = 1.7\text{ МПа}$ (рис.4а). Расхождение составляет 2.4%. Таким образом, расчет по (8) приводит к удовлетворительным результатам и при варьировании толщины обшивки. Сравнивая

результаты рис.4а и рис.2а, приходим к выводу, что уменьшение толщины обшивки почти в 1.6 раза с 30 мм до 19 мм привело к снижению предельной нагрузки всего на 10.8%. Объясняется это тем, что, как следует из зависимости (12), толщина присоединенного пояса при значительной его ширине несущественно влияет на предельный момент сопротивления: при $t_d = 30\text{ мм}$ имеем $W_y = 1265\text{ см}^3$, а при $t_d = 19\text{ мм}$ получим $W_y = 1166\text{ см}^3$. Снижение W_y не превышает 8%.

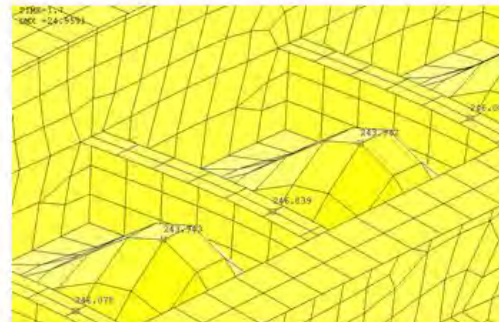
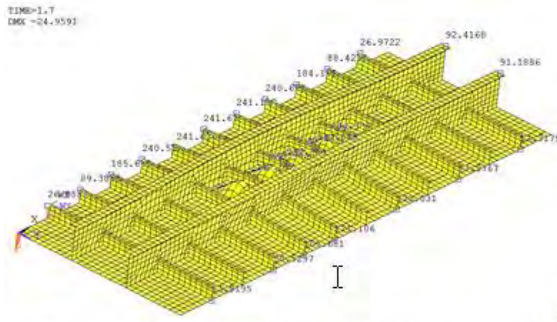


Рис.4. Перекрытие ледокола *Wind* при толщине обшивки $t_d = 19\text{ мм}$: а/ общее распределение напряжений; б/ напряжения в обшивке и шпангоутах между стрингерами

Судя по результатам расчета, представленным на рис.4б, при толщине обшивки $t_d = 19\text{ мм}$ напряжения в ней посередине пролета шпации превышают предел текучести и достигают величины $\sigma_{max}^{обшивки} = 244\text{ МПа}$.

прогиб среднего шпангоута не превышает $w_{max}^{МКЭ} = 10.4\text{ мм}$.

Влияние размеров площади нагружения

Общий характер деформирования показал, что при предельной нагрузке существенные деформации возникают только в районе относительно узкой полосы приложения нагрузки. При этом 5 средних шпангоутов получают пластические деформации, а в 3-х крайних шпангоутах с каждой стороны перекрытия, находящихся вне зоны нагружения, имеют место только упругие деформации. В средней части шпангоутов между стрингерами большая часть стенки и свободные пояски шпангоутов находятся в упругопластическом состоянии за исключением узкой зоны, примыкающей к обшивке (рис.4б). Стрингеры работают полностью в упругой зоне. Максимальный

Если бы ледокола типа *Wind* строился на ледовый класс Arc5, то из [6] $a_3 = 0.78$ и $C_3 = 0.4$. Тогда по (1) - (3) получим $p_{BI} = 1280\text{ кПа}$; $b_B = 0.747\text{ м}$; $l_B = 4.48\text{ м}$.

При увеличении площади нагружения ледового пояса до величины $4.67\text{ м} * 0.778\text{ м}$ интенсивность предельной нагрузки уменьшается до величины $p_y^{МКЭ} = 1.33\text{ МПа}$ (рис.5а), а по (8) получаем $p_y^{meop} = 1.39\text{ МПа}$. Расхождение составляет $\delta = 4.5\%$. Поскольку $p_y^{МКЭ} > p_{BI}$, то ледокол типа *Wind* вполне соответствует ледовому классу Arc5.

На рис.5б показано распределение напряжений в среднем шпангоуте между стрингерами.

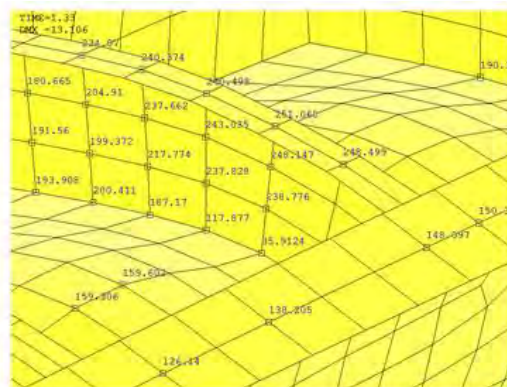
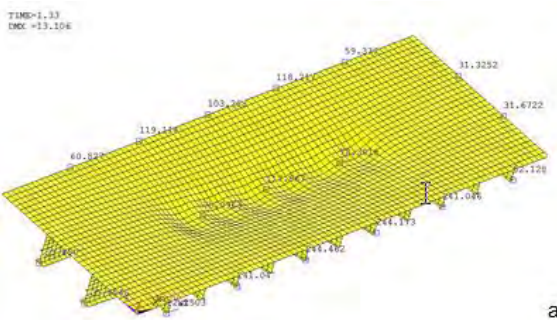


Рис.5. Перекрытие ледокола *Wind*: а/ общее распределение напряжений; б/ напряжения в обшивке и шпангоутах между стрингерами при площади нагружения $4.67\text{ м} * 0.778\text{ м}$

При дальнейшем увеличении площади нагружения до величины $6.84\text{ м} \times 1.14\text{ м}$ интенсивность предельной нагрузки по МКЭ уменьшается до величины $p_y^{МКЭ} = 0.9\text{ МПа}$ (рис.6а), при величине по (8) $p_y^{теор} = 0.857\text{ МПа}$. Расхождение $\delta = 3.7\%$. При указанной нагрузке (рис.6а) уже наблюдается фибровая текучесть

стрингеров, так как общая нагрузка на перекрытие возросла до $Q_y^{МКЭ} = 4150\text{ кН}$ по сравнению с $Q_y^{МКЭ} = 3220\text{ кН}$ в предыдущем варианте. Напряжения в обшивке по-прежнему не превышают предела текучести.

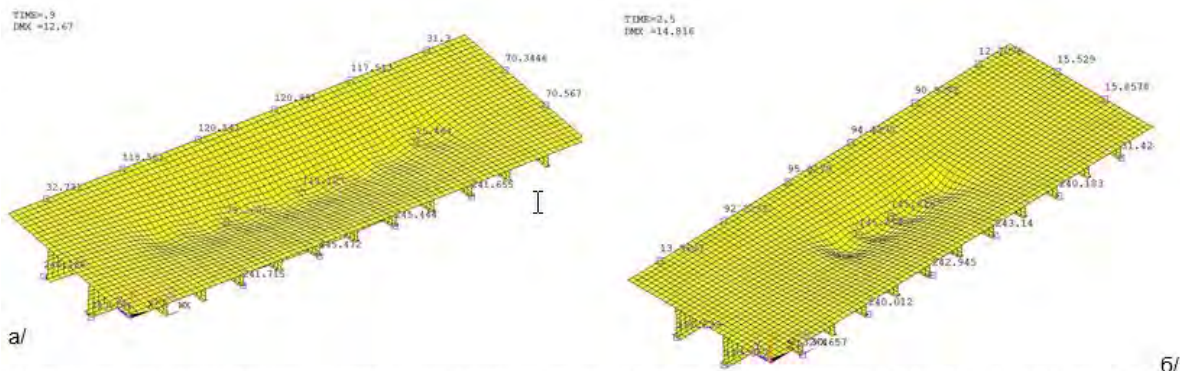


Рис. 6. Общее распределение напряжений в перекрытии: а/ при площади нагрузки $6.84\text{ м} \times 1.14\text{ м}$; б/ при площади нагрузки $3.0\text{ м} \times 0.5\text{ м}$

Наконец, для варианта нагружения $l_B * b_B = 3\text{ м} \times 0.5\text{ м}$ расчет по МКЭ дает $p_y^{МКЭ} = 2.5\text{ МПа}$ (рис.6б) при значении по (8) $p_y^{теор} = 2.51\text{ МПа}$ с расхождением $\delta = 0.4\%$. Характер распределения напряжений в шпангоутах и стрингерах почти не изменился по сравнению с первым вариантом нагружения, но существенно возросли напряжения в обшивке, так как возросла интенсивность распределенной нагрузки на нее.

Отметим, что в зависимости (8) совершенно никакой роли не играет длина перекрытия L , так как при выводе ее предполагалось, что расчетной длиной участка является только нагружаемая его часть с примыканием к ней по одной шпации справа и слева.

Заключение

1. Полученные данные по упругопластическому деформированию бортового перекрытия при ледовой нагрузке в пределах некоторой прямоугольной площади между

стрингерами показали, что аналитическая зависимость (8), приведенная в справочнике по СМК [7], дает близкие к расчетам МКЭ результаты при использовании числового коэффициента $k_y = 2.34$.

2. При жесткой заделке контура перекрытия пластические шарниры образуются прежде всего в районах заделок и посредине пролетов нагруженных шпангоутов. Причем в силу несимметричного по высоте профиля достичь пластического деформирования присоединенного пояска обшивки при линейном характере упрочнения очень трудно даже при секущем модуле равном $E_t = 0.01E$.

3. При нагружении перекрытия в пределах фиксированных размеров предельная нагрузка p_y обратно пропорциональна шпации.

4. Увеличение толщины обшивки не столько повышает несущую способность перекрытия, как снижает вероятность появления в обшивке пластических деформаций.

Литература

1. Апполонов, Е.М. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах / Е.М. Апполонов, А.Б. Нестеров, О.Я. Тимофеев // Науч.-техн. сб. Российского Морского Регистра Судоходства. – СПб., Вып. 31, 2008. - С. 129 – 146.
2. Varabanov, N.V. Structural design of sea-going ships. - Moscow: Mir publishers, 1976. - 464с.
3. Рывлин А.Я., Хейсин Д.И. Испытания судов во льдах. / А.Я. Рывлин, Д.И. Хейсин – Л.: Судостроение.1980. 208с.
4. Etchart F. Experimental and numerical research on the interaction between ice floes and a ship's hull during icebreaking. // Schrifreihe Schiffbau. – Hamburg: Hamburg-Harburg. Bericht, # 622. 2003. – 89 p.
5. Василик, Е.Г. Исследование процессов глубокого пластического деформирования перекрытия газовева с помощью моделей метода конечных элементов / Е.Г. Василик, В.А. Коршунов, Д.А. Пономарев, А.А. Родионов // «Труды Крыловского государственного научного центра». – СПб., Вып.82 (366). 2014. - С.121-128.
6. Коршунов, В.А. Предельное состояние жесткопластической балки в виде несимметричного двутавра при комбинированном нагружении / В.А. Коршунов, Д.А. Пономарев, А.А. Родионов // «Морские интеллектуальные технологии». – СПб., №2(28) Т.1. 2015. - С. 27-35.

7. Справочник по строительной механике корабля. Т.1. /Под ред. Паляя О.М. –Ленинград: Судостроение, 1982. - 376с.
8. Belenkiy, L. Handbook on Plastic Analysis in Engineering. /L. Belenkiy - USA Backbone Publishing Co., 2006.- 1055p.
9. Jirasek M., Bazant Z. Inelastic analysis of structures. / M. Jirasek, Z. Bazant – England, Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2002, - 734 p.
10. Регистр РФ. Правила классификации и постройки морских судов..ч.II, Корпус- СПб.: 2016. -196с.

References

1. Appolonov, E.M., Nesterov A.B., Timofeev O. Ya. Reglamentazia ledovyh nagruzok na vertical'nyj bort pri szhatii vo l'dah [Reglamentation of ice loading to vertical board under compression in ice] / Sci.-technical collection of Russian maritime Register of shipping.– SPb., Vol. 31. 2008. pp. 129–146.
2. Barabanov, N.V. Structural design of sea-going ships. - Moscow: Mir publishers, 1976. 464с.
3. Ryvlin A.Ja., Heisin D.I. Ispytanija sudov vo l'dah [Testing of ships in ices]. – Leningrad.: Sudostroenie. 1980. 208p.
4. Etchart F. Experimental and numerical research on the interaction between ice floes and a ship's hull during icebreaking. // Schriftreihe Schiffbau. – Hamburg: Hamburg-Harburg. Bericht, # 622. 2003. – 89 p.
5. Vasilik E.G., Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Issledovanie protsessov glubokogo plasticheskogo deformirovania perekrytia gazovoza s pomoshchyu modelej metoda konechnyh elementov [Research of the deep plastic deformation process of the gas carrier grillage with help of the finite element model]. The Proceedings of the Krylov State Research Centre. Вып.82 (366). СПб. 2014. с.121-128.
6. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Predel'noe sostoyanie zhostkoplachestikoj balki v vide nesimmetrichnogo dvutavra pri kombinirovanom nagruzhении. [Limit state of rigid-plastic beam in form of nosymmetric I-beam under combined loading] Morskie intellektual'nye tekhnologii. №2(28) V.1. 2015. с.27-35.
7. Spravochnik po stroitel'noj mekhanike korablia. [Handbook on structural mechanics of ship] v.1. /Editor Palij O.M. –Leningrad: Shipbuilding. 1982. 376p.
8. Belenkiy, L. Handbook on Plastic Analysis in Engineering. /L. Belenkiy - USA Backbone Publishing Co., 2006. 1055p.
9. Jirasek M., Bazant Z. Inelastic analysis of structures. England, Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2002, - 734 p.
10. Pravila klassifikacii i postroiki morskikh sudov [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Rossiiskij morskoi registr sudokhodstva, 2018. 209 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Игоревич Притыкин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры кораблестроения, декан факультета «Судостроение и энергетика», Калининградский государственный технический университет 236016, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Alexej I. Pritykin, Dr.Sci.(Eng), associate professor, professor of the department of shipbuilding, dean of the shipbuilding and energy faculty, Kaliningrad State Technical University, 236016, Kaliningrad, Sovietskij ave., 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.08.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 629.5.015.4

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.002>**Анализ частот колебаний балок с регулярно расположенными вырезами**А.И. Притыкин¹ e-mail: prit_alex@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В справочной литературе содержатся расчетные зависимости для частот свободных колебаний балок со сплошной стенкой, но отсутствуют данные по собственным колебаниям перфорированных балок. В то же время в судостроении и строительной практике широко распространены балки с перфорированной стенкой, содержащей вырезы круглой, овальной и прямоугольной формы. В статье проведен анализ влияния вырезов на частоту свободных колебаний перфорированных свободно опертых балок. При этом первоначально рассматривались балки со сплошной стенкой, а затем балки таких же размеров с вырезами. Для удобства практических вычислений известная зависимость была трансформирована к виду, позволяющему оценить частоту колебаний только по соотношению площадей полки и стенки и габаритным размерам балки без необходимости определения ее момента инерции и погонной массы. Аналогичные зависимости были получены и для перфорированных балок с круглыми и прямоугольными вырезами, в которых дополнительными факторами являлись параметры перфорации: относительная высота вырезов и относительная ширина перемычек. При отсутствии вырезов формулы для перфорированных балок сводятся к формуле для балки со сплошной стенкой. Сравнительный анализ частот проводился путем расчета по аналитическим зависимостям и методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. На основе проведенного анализа сделан вывод, что наличие регулярно расположенных вырезов с высотой, не превышающей рекомендации Морского Регистра РФ, в зависимости от параметров перфорации приводит к разному повышению частот собственных колебаний однопролетных балок, хотя степень их повышения невелика. Предложенные аналитические зависимости для балок разного конструктивного оформления удовлетворительно согласуются с результатами расчетов МКЭ.

Ключевые слова: однопролетная перфорированная балка, частота свободных колебаний, круглые и прямоугольные вырезы, аналитические зависимости, МКЭ.

Analysis of vibration of beams with regularly located openingsAlexej I. Pritykin¹ e-mail: prit_alex@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. In manual on the ship structural mechanics the analytical relations for determination of the natural frequencies of the beams with solid web are given, but there are no data about proper vibration of perforated beams. At the same time in shipbuilding and in structural industry the perforated beams with circular, rectangular and oval openings are widely used. In this article the analysis of influence of openings on the natural frequencies of the simply supported perforated beams is performed. Initially it was considered beams with solid web and then beams of the same dimensions with openings. For commodity of practical calculations, the well-known relation was transformed to the form allowing to appreciate frequency of vibration only with knowledge of ratio of areas of shelves and web without necessity of finding their moment of inertia and running mass of beam. Similar relations were obtained for perforated beams with circular and rectangular openings, in which additional arguments were such parameters of perforation as related depth of openings and related width of web-posts. In case of absence of openings, the formulas for perforated beams are reduced to formula for beam with solid web. Comparative analysis was performed by calculations according to analytical relations and with the finite element method using the program complex ANSYS. On base of performed analysis it was made conclusion that existence of regularly located openings with depth not extending recommendations of Russian Maritime Register, in dependence on parameters of perforation brings to different increasing of natural frequencies of vibration of one span beams, although degree of this increasing is not high. Suggested analytical relations for beams of different constructive design are in a good correlation with results obtained by the finite element method.

Key words: one span perforated beam, natural frequencies of vibration, circular and rectangular openings, analytical relations, FEM.

Введение

В различных справочниках [1, 2], как и в современных публикациях [3-5], содержатся аналитические зависимости для собственных частот колебаний балок с разным видом закрепления концов. Однако нигде не приводятся данные по собственным колебаниям перфорированных балок, широко применяемым как в судостроении, так и в строительстве. Целью данной работы было получение удобной для инженерных расчетов аналитической зависимости для частот собственных колебаний перфорированных балок при разных параметрах перфорации. Выяснение корректности полученной зависимости производилось путем

сопоставления результатов с данными расчетов МКЭ. Проведено также сравнение частот с аналогичными величинами балок со сплошной стенкой. Анализ проводился методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS, для чего была составлена программа на языке APDL [6], позволившая производить расчеты колебаний как балок с вырезами, так и со сплошной стенкой. Для проверки надежности работы программы были проведены расчеты балок без вырезов, поскольку имеются теоретические зависимости, с которыми можно сравнить результаты МКЭ.

1. Расчет балок со сплошной стенкой

Балку со сплошной стенкой будем обозначать как $l - h_w - t_w - b_f - t_f$, где высота стенки $h_w = H - t_f$, H – полная высота балки; t_w и t_f – толщина стенки и полки соответственно; b_f – ширина полки.

Как известно, частота собственных колебаний свободно опертой балки определяется зависимостью [1]

$$f_{cнл} = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{EI / m}, \quad (1)$$

где E , I , m – модуль Юнга, момент инерции сечения и погонная масса балки соответственно; n – номер тона колебаний. Величину m можно представить в виде

$$m = (2b_f t_f + h_w t_w) \rho, \quad (2)$$

где $(2b_f t_f + h_w t_w)$ – площадь поперечного сечения балки; ρ – плотность материала балки. В дальнейших расчетах плотность стали будем принимать равной

$$\rho = 7800 \text{ кг} / \text{м}^3 = 7.8 \cdot 10^{-9} \text{ Нс}^2 / \text{мм}^4.$$

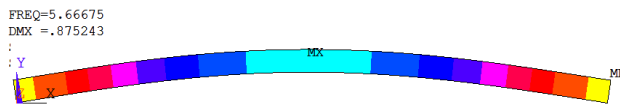
Момент инерции I двутавровой симметричной балки может быть приближенно подсчитан как

$$I = b_f t_f h_w^2 / 2 + h_w^3 t_w / 12. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$\omega_{cнл}^{meop} = \frac{3.14 \cdot 0.75}{2 \cdot 20.25^2} \sqrt{0.5 \cdot 2.1 \cdot 10^{11} \cdot (0.227 + 0.167) / ((2 \cdot 0.227 + 1) \cdot 7.8 \cdot 10^3)} = 5.49 \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

Расчет МКЭ первого тона колебаний этой же балки с использованием четырехугольных конечных элементов Shell63 размерами $\Delta_{КЭ} = h_w / 30$ приводит к значению $\omega_{cнл}^{МКЭ} = 5.67 \text{ Гц}$ (рис.1а), что указывает на расхождение с $\omega_{cнл}^{meop} = 5.49 \text{ Гц}$ (7) в



а) $\omega_{cнл}^{МКЭ} = 5.67 \text{ Гц}$; $\omega_{cнл}^{meop} = 5.49 \text{ Гц}$; $\delta = 3.2\%$

$$f_{cнл} = \frac{n^2 \pi^2 h_w}{l^2} \sqrt{0.5 E (\alpha + 0.167) / ((2\alpha + 1) \rho)}, \quad (4)$$

где $\alpha = b_f t_f / h_w t_w = A_f / A_w$ – соотношение площадей полки и стенки.

Поскольку чаще всего нас интересуют первые частоты колебаний, то в зависимости (4) в дальнейшем будем принимать $n = 1$. При сравнении круговой частоты колебаний f , полученной аналитически, и частоты ω , полученной из расчетов МКЭ, следует помнить, что связь между f и ω имеет вид

$$\omega = f / 2\pi. \quad (5)$$

В дальнейшем для возможности сопоставления результатов по аналитической зависимости и по МКЭ без расчетов все расчеты будем производить в герцах и для частот, полученных разными методами, использовать обозначения $\omega_{cнл}^{meop}$ и $\omega_{cнл}^{МКЭ}$, где верхний индекс указывает метод расчета. Для 1-го тона колебаний свободно опертой двутавровой балки со сплошной стенкой величина $\omega_{cнл}^{meop}$ согласно (4) и (5) примет вид

$$\omega_{cнл}^{meop} = \frac{\pi h_w}{2l^2} \sqrt{0.5 E (\alpha + 0.167) / ((2\alpha + 1) \rho)}. \quad (6)$$

Для свободно опертой двутавровой балки со сплошной стенкой $2025 - 75 - 1.52 - 17 - 1.52 \text{ см}$ расчет по (6) при значении модуля Юнга $E = 210 \text{ ГПа}$ приводит к значению

3.2% . Для второго тона колебаний имеем значения $\omega_{cнл}^{МКЭ} = 21.53 \text{ Гц}$ (рис.1б) и $\omega_{cнл}^{meop} = 21.96 \text{ Гц}$, что приводит к расхождению в 2% . Соотношение между частотами 1-го и 2-го тона по МКЭ равно 3.79, а не 4-м, как это следует из зависимости (4).



б) $\omega_{cнл}^{МКЭ} = 21.53 \text{ Гц}$; $\omega_{cнл}^{meop} = 21.96 \text{ Гц}$; $\delta = 2\%$

Рис.1. Частоты колебаний двутавровой балки $20250 - 750 - 15.2 - 170 - 15.2 \text{ мм}$: а) 1-ый тон колебаний; б) 2-ой тон колебаний

Если положить в (6) $\alpha = 0$, то получим частоту колебаний 1-го тона балки прямоугольного сечения в виде

$$\omega_{cнл}^{meop} = \frac{\pi h_w}{4l^2} \sqrt{E / 3\rho}. \quad (8)$$

Как видно из (8), для балки прямоугольного сечения ω не зависит от ширины сечения, а только от отношения h_w / l^2 . Если это соотношение будет постоянным, то и частота колебаний не изменится. Расчеты МКЭ подтверждают это утверждение.

2. Расчет балок с круглыми вырезами

Как отмечается в монографии Н.В. Барабанова [7], в судовых конструкциях наиболее распространены вырезы круглой и овальной формы, хотя в сухогрузах встречаются и флоры с регулярно расположенными прямоугольными вырезами. В данной работе рассматриваются только круглые и прямоугольные вырезы, которые удобны для численного анализа.

Перфорированную балку с круглыми вырезами будем обозначать как $l - h_w - t_w - b_f - t_f - \beta - \xi$, где в дополнение к обозначениям, принятым для балки со сплошной стенкой, введены величины $\beta = d / h_w$ - относительная высота вырезов и $\xi = c / d$ - относительная ширина перемычки; $d = \beta h_w$ - диаметр вырезов. Для перфорированной балки согласно (1) с учетом (5) при $n = 1$ имеем

$$\omega_{перф.}^{теор} = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{EI_{перф} / m_{перф}} \quad (9)$$

Для нахождения $\omega_{перф.}^{теор}$ надо правильно вычислить $I_{перф}$ и $m_{перф}$. Величину $m_{перф}$ определить несложно, путем вычитания из объема материала балки в пределах шага S объема выреза в виде круглого диска диаметром βh_w и толщиной, равной

$$\omega_{круг.}^{теор} = \frac{\pi h_w}{2l^2} \sqrt{E0.5(\alpha + (1 - 0.5\beta^3) / 6) / ((2\alpha + 1 - \pi\beta / (4(1 + \xi)))) \rho} \quad (12)$$

Нетрудно видеть, что зависимость (12) при отсутствии вырезов, т. е. при $\beta = 0$, сводится к формуле (6) для балки со сплошной стенкой. Нижний индекс в (12) указывает на наличие перфорации в виде круглых вырезов. Проверить приемлемость зависимости (12) можно только расчетом МКЭ.

На рис.2а приведены результаты расчета МКЭ свободно опертой балки 20250-750-15-170-15мм при отсутствии вырезов. Частота колебаний первого тона равна $\omega_{спл}^{МКЭ} = 5.58 Гц$, а вычисления по (6) дают $\omega_{спл}^{теор} = 5.39 Гц$, что указывает на расхождение в

толщине стенки балки t_w . Тогда, разделив полученный объем на величину шага S , получим

$$m_{перф} = (2A_f + A_w - \pi(\beta h_w)^2 t_w / 4s) \rho,$$

(10)

где $s = \beta h_w (1 + \xi)$ - шаг вырезов.

Ситуация с величиной $I_{перф}$ несколько сложнее, поскольку момент инерции синусоидально меняется по длине. Понятно, что он будет занимать промежуточное положение между моментом инерции сплошной балки и моментом инерции, вычисленным по сечению с вырезом. Если принять величину $I_{перф}$ равной среднему значению между моментом инерции балки со сплошной стенкой (3) и моментом инерции по вырезу, то получим

$$I_{перф} = 0.5h_w^3 t_w (A_f / A_w + (1 - 0.5\beta^3) / 6) \quad (11)$$

Подстановка (10) и (11) в (9), принимая во внимание S , дает

значениях $\delta = 3.4\%$. Расчет МКЭ перфорированной свободно опертой балки тех же размеров с параметрами 20250-750-15-170-15мм-0.667-0.5

(рис.2б) дает $\omega_{круг}^{МКЭ} = 6.02 Гц$, а по (12) получим

$\omega_{круг}^{теор} = 5.98 Гц$. Различие в частотах для перфорированной балки по МКЭ и по (12) не превышает величины $\delta = 0.5\%$. Как видно из приведенных результатов, наличие перфорации повышает частоту колебаний примерно на 8%, по сравнению с балкой со сплошной стенкой.

FREQ=5.57776
DMX = .887367



а) 20250-750-15-170-15мм

$$\omega_{спл}^{МКЭ} = 5.58 Гц ; \omega_{спл}^{теор} = 5.39 Гц ; \delta = 3.4\%$$

FREQ=6.02447
DMX = 1.01974



б) 20250-750-15-170-15мм-0.667-0.5

$$\omega_{круг}^{МКЭ} = 6.02 Гц ; \omega_{круг}^{теор} = 5.98 Гц ; \delta = 0.5\%$$

Рис. 2. Частоты колебаний двутавровой балки: а) сплошной; б) перфорированной

Характерно, что повышение частоты колебаний балки при наличии вырезов вполне соответствует закономерности, относящейся и к балкам со сплошной стенкой. Действительно, согласно (6) под корнем находится дробно-линейная функция $(\alpha + 0.167) / (2\alpha + 1)$, которая при положительном детерминанте, составленном из ее коэффициентов, представляет собой при росте аргумента α монотонно возрастающую функцию. Уменьшение толщины стенки при сохранении неизменными размеров полков и общей высоты балки ведет к увеличению α и, следовательно, к увеличению $\omega_{спл}^{теор}$.

Следует отметить, что перфорация балок в строительстве и в судостроении несколько различна. Это различие в основном касается относительной ширины перемычек ξ . Если в вариантах перфорации, характерных для судовых конструкций, $\xi \geq 1$ (рис.3а и рис.3б), то в балках строительных сооружений этот параметр варьируется в пределах $0.25 \leq \xi \leq 0.5$ (рис.2б).

Сохраняя одинаковой высоту вырезов и меняя только их шаг (рис.3а и рис.3б), выясняем, что шаг вырезов в широком диапазоне несущественно влияет на частоту колебаний балки.

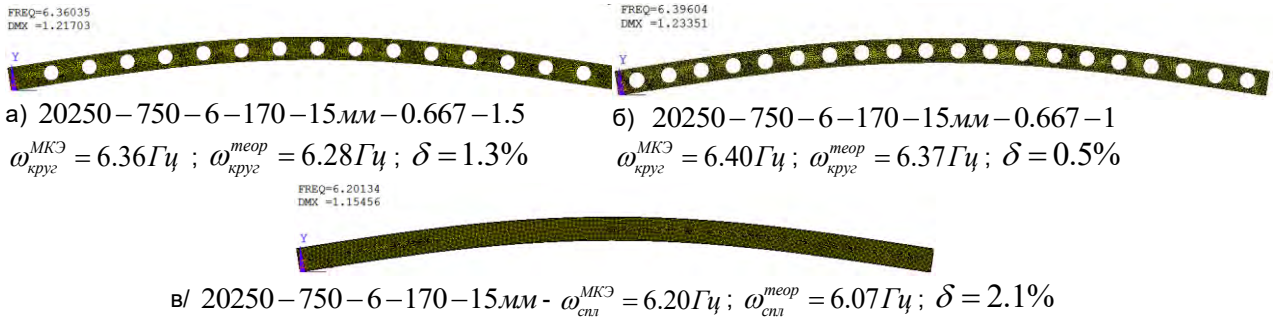


Рис.3. Частоты колебаний двутавровой балки 20250–750–6–170–15.2мм–0.667– ξ с разным шагом вырезов: а) $\xi = 1.5$; б) $\xi = 1$; в/ сплошная

Из (12) следует, что при одинаковых габаритных размерах балки влияние одной и той же перфорации на частоту свободных колебаний балки будет разным в зависимости от соотношения площадей полки и стенки $\alpha = A_f / A_w$. Проанализируем это влияние на балке тех же габаритных размеров, но с более тонкой стенкой 20250–750–6–170–15мм–0.667– ξ . Из представленных выше результатов видно, что эффект перфорации проявляется тем меньше, чем больше соотношение площадей полки и стенки при заданной высоте балки. Если для балки с величиной $\alpha = 0.231$ (рис.2б) наличие вырезов повышает

частоту колебаний примерно на 8%, то для балок с $\alpha = 0.578$ (рис.3б) это повышение не достигает и 4%. Из рис.3 и рис.4 видно, что аналитическая зависимость (12) дает вполне приемлемые результаты как для балок с редкой перфорацией, характерной для судовых конструкций (рис.3), так и для балок строительных конструкций (рис.4). Расхождение в величинах частот во всех случаях не превышает $\delta = 2.6\%$. На рис.4 приведены колебания балок тех же размеров, что и на рис.3, но с меньшим шагом вырезов. Отметим, что в целом влияние перфорации на колебания балок не слишком большое, но во всех случаях при разных параметрах наличие вырезов приводит к повышению частоты колебаний.

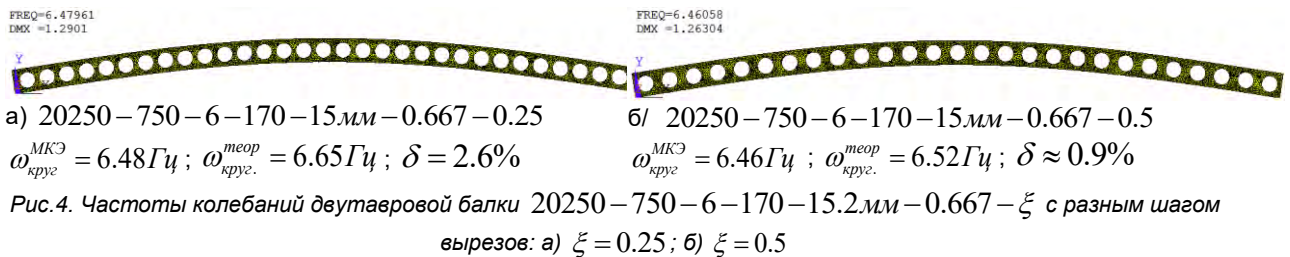


Рис.4. Частоты колебаний двутавровой балки 20250–750–6–170–15.2мм–0.667– ξ с разным шагом вырезов: а) $\xi = 0.25$; б) $\xi = 0.5$

3. Расчет балок с прямоугольными вырезами

Приняв для балки с прямоугольными вырезами высоту вырезов βh_w ; ширину выреза $\gamma \beta h_w$; площадь выреза $\gamma(\beta h_w)^2$; относительную ширину

перемычки $\xi = c / \gamma \beta h_w$; шаг вырезов $s = (1 + \xi) \gamma \beta h_w$, погонную массу можно записать в виде

$$m_{\text{прям}} = h_w t_w (2\alpha + 1 - \beta / (1 + \xi)) \rho. \quad (13)$$

Тогда из (9) с учетом (11) и (13) получим

$$\omega_{\text{прям}}^{\text{теор}} = \frac{\pi h_w}{2l^2} \sqrt{E 0.5(\alpha + (1 - 0.5\beta^3) / 6) / ((2\alpha + 1 - \beta / (1 + \xi)) \rho)}. \quad (14)$$

Балки с прямоугольными вырезами легче анализировать с помощью МКЭ. Как видно из (14), частота колебаний перфорированной балки не зависит от относительной ширины вырезов γ . Этот, кажущийся странным результат, на самом деле вполне логичен, так как при разной ширине вырезов, но одинаковой относительной ширине перемычек ξ , погонная масса балки оказывается одинаковой. На рис.5 приведены результаты расчета МКЭ балок с разными параметрами перфорации. На рис.5а балка 20250–750–6–170–15мм–0.667–1–1 имеет

квадратные вырезы с относительной высотой $\beta = 0.667$, $\gamma = 1$ и величиной $\xi = 1$. Такая перфорация аналогична перфорации круглыми вырезами, приведенными на рис.3б. Как видно из сравнения указанных данных, при одинаковом числе вырезов и их высоте частота колебаний балки с круглыми вырезами $\omega_{\text{круг}}^{\text{МКЭ}} = 6.40 \text{ Гц}$ оказывается на 2.5% выше частоты колебаний балки с квадратными вырезами $\omega_{\text{прям}}^{\text{МКЭ}} = 6.25 \text{ Гц}$. Объяснить это можно меньшей массой балки с квадратными вырезами.

Расхождение с величиной по (14) не превышает значения $\delta = 2.6\%$.

Уменьшение относительной высоты вырезов до $\beta = 0.5$ (рис.5б) приводит к величине $\omega_{\text{прям}}^{\text{МКЭ}} = 6.4 \text{ Гц}$, что дает расхождение с расчетом по

(14) в $\delta = 0.2\%$. При удлиненных прямоугольных вырезах с параметрами $\beta - \gamma - \xi = 0.5 - 2 - 0.5$ (рис.5в) частота колебаний близка к той, что имеет балка с квадратными вырезами (рис.5б).

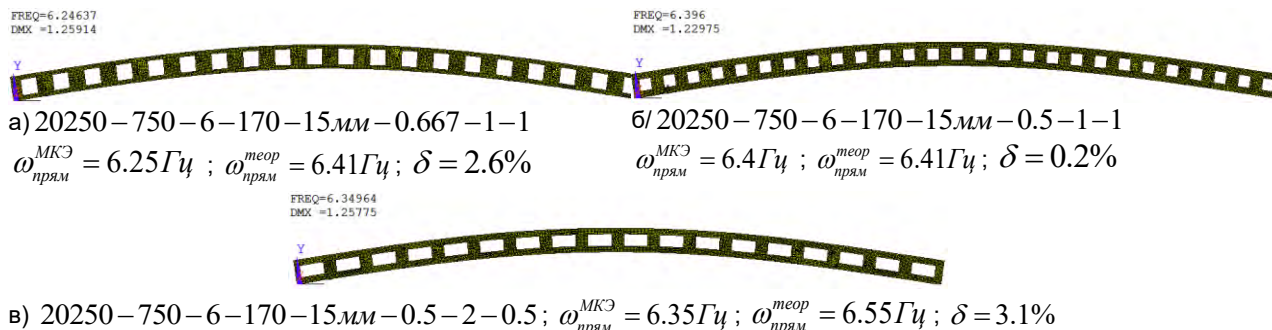


Рис. 5. Частота колебаний флора с прямоугольными вырезами: а) при $\beta - \gamma - \xi = 0.667 - 1 - 1$; б) при $\beta - \gamma - \xi = 0.5 - 1 - 1$; в) при $\beta - \gamma - \xi = 0.5 - 2 - 0.5$

Балка с прямоугольными удлиненными вырезами (рис.5в) по сути близка к балке с овальными вырезами, но гораздо легче поддается анализу МКЭ. Если сравнить частоту колебаний этой балки с балкой без вырезов (рис.3в), то отметим, что эффект вырезов не превышает 2.5%, т. е. находится в пределах погрешности вычислений. Конечно, столь слабое влияние объясняется относительно тонкой стенкой: $\alpha = 0.567$. С уменьшением этого отношения эффект вырезов возрастет.

4. Расчет консольного стержня

В строительных конструкциях часто встречаются и перфорированные консольные стержни, используемые, например, в козырьках торговых

$$\omega_{\text{конс}}^{\text{перф}} = \frac{0.562 h_w}{l^2} \sqrt{E 0.5(\alpha + (1 - 0.5\beta^3)) / 6) / ((2\alpha + (1 - \pi\beta / (4(1 + \xi))))\rho)}. \quad (16)$$

При $\beta = 0$ зависимость (16) дает частоту колебаний консольного стержня со сплошной стенкой.

Расчет МКЭ консольного стержня без вырезов с параметрами 20250-750-6-250-17мм приводит к значению частоты $\omega_{\text{конс}}^{\text{МКЭ}} = 2.27 \text{ Гц}$ (рис.6а). Вычисления по (16) при $\beta = 0$ дает $\omega_{\text{конс}}^{\text{теор}} = 2.269 \text{ Гц}$, т. е. расхождение с МКЭ практически отсутствует. В справочнике [1] зависимость (15) приведена с коэффициентом 3.47

комплексов. В судостроении к таким конструкциям можно отнести полубимсы, расположенные в районе люков. Поэтому проведем расчет колебаний консольного стержня. В учебнике А.А. Курдюмова [8] приведена полученная методом Рэлея формула для частоты колебаний первого тона консольного стержня в виде

$$\omega_{\text{конс}}^{\text{теор}} = \frac{3.53}{l^2} \sqrt{EI / m}. \quad (15)$$

Согласно проведенным выше выкладкам зависимость (15) для первого тона колебаний перфорированного консольного стержня принимает форму

вместо 3.53, но, как видим, коэффициент 3.53 более соответствует расчету МКЭ.

При наличии перфорации с параметрами $\beta = 0.667$ и $\xi = 0.5$ частота колебаний стержня, вычисленная МКЭ, будет равна $\omega_{\text{конс}}^{\text{МКЭ}} = 2.345 \text{ Гц}$ (рис.6б), в то время как теоретическое значение согласно (16) дает значение $\omega_{\text{конс}}^{\text{теор}} = 2.39 \text{ Гц}$. Расхождение в величинах составляет $\delta = 1.9\%$.

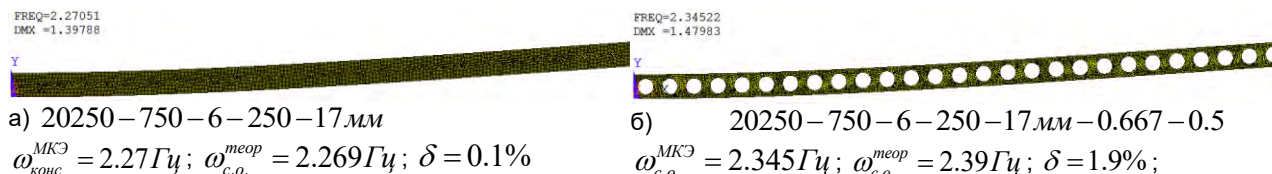


Рис. 6. Частоты колебаний консольного стержня: а/ со сплошной стенкой; б/ перфорированного

Таким образом, полученные соотношения (12), (14) и (16) удовлетворительно отображают частоты

колебаний перфорированной балки и консольного стержня соответственно. Правда, расчеты балок со

сплошной стенкой указывают, что наличие вырезов незначительно влияет на частоту колебаний первого тона.

Заключение

Полученная зависимость для частот свободных колебаний двутавровой перфорированной балки с круглыми вырезами (12) удобна для инженерных расчетов, так как нет надобности вычислять момент инерции и погонную массу балки, а достаточно лишь знать соотношение площадей полки и стенки, длину и высоту стенки балки, а также параметры перфорации. При отсутствии вырезов указанная зависимость приводит к формуле (6) для частот колебаний балки со сплошной стенкой.

Сравнительный анализ показал, что наличие перфорации увеличивает частоты колебаний балки примерно на 2.5-8%, причем большее значение относится к перфорации с меньшим шагом вырезов.

Расчеты с использованием программного комплекса ANSYS показали, что по сравнению с МКЭ погрешность вычислений по (12) первых частот свободных колебаний шарнирно опертой перфорированной балки с $\beta = 0.667$ не превышает 2.6% при разном относительном шаге круглых вырезов.

Влияние одной и той же перфорации на частоту свободных колебаний балки сказывается по-разному в зависимости от соотношения площадей полки и стенки: чем больше это соотношение при заданной высоте балки, тем меньше эффект перфорации. Исследования проведены для диапазона $0.227 \leq \alpha \leq 0.578$

Зависимость (16) удовлетворительно описывает частоту свободных колебаний перфорированного консольного стержня.

Литература

1. Справочник по строительной механике корабля: в 3 т. /Под ред. Палия О.М. – Ленинград: Судостроение. 1982. – Т. 3. - 318с.
2. Прочность, устойчивость, колебания: справочник: в 3 т. /под ред. И.А. Биргера и Я.Г.Пановко. – Москва: 1968.– Т. 3. - 831с.
3. Костин Г.В., Саурин В. В. О свободных колебаниях балок / Доклады Академии наук. 2006. -Том 411. № 5. – с.617-621.
4. Турищев Л.С. К определению собственных частот свободных колебаний неразрезных балок / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Строительство. 2007. № 12. – С. 34-38.
5. Турищев Л.С. К определению собственных частот свободных колебаний балок / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Строительство. 2015. № 8. – С. 40-44.
6. Притыкин, А.И. Программа Vibration-Grillage создания и расчета МКЭ параметров вибрации модели перекрытия со шпангоутами и стрингерами / А.И. Притыкин, // Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №202020666697 РФ от 21.12.2020г.
7. Barabanov, N.V. Structural design of sea-going ships. - Moscow: Mir publishers, 1976. – 464с.
8. Курдюмов А.А. Вибрация корабля. Ленинград: Судпромгиз. 1961. – 319с.

References

1. Spravochnik po stroitel'noj mekhanike korablja [Manual on Structural mechanics of ship]. V.3. /Under edit. of O.M. Paliy. Shipbuilding. 1982. 318p.
2. Prochnost', ustojchivost', kolebania: spravochnik [Strength, stability, vibration: manual] / Under edit. of I.A. Birger & Ja.G.Panovko. Moskow: 1968. V. 3. 831p.
3. Kostin G.V., Saurin V. V. O svobodnykh kolebaniyah balok [About natural vibration of beams] / Reports of Academy of Science. 2006. V. 411. # 5. pp.617-621.
4. Turishchev L.S. K opredeleniju sobstvennykh chastot svobodnykh kolebanij nerazreznykh balok [To determination of proper friquancies of natural vibration of continuous beams] / Gerald of Polozk state university. Seria B. Applied Sci. Construction. 2007. # 12. Pp. 34-38.
5. Turishchev L.S. K opredeleniju sobstvennykh chastot svobodnykh kolebanij balok [To determination of proper friquancies of natural vibration of beams] / Gerald of Polozk state university. Seria B. Applied Sci. Construction. 2015. # 8. Pp. 40-44.
6. Pritykin A.I. Programma Vibration-Grillage sozdania I rascheta MKE parametrov vibrzii modeli perekrytia so shpangoutami I stringerami [Program Vibration-Grillage creation and calculation by FEM parameters of vibration of Grillage model with spaces and stringers], // Svidetel'stvo o gosregistrzii programmy dlja EVM №2020666697 RUS 21.12.2020.
7. Barabanob, N.V. Structural design of sea-going ships. Moscow: Mir publishers, 1976. 464p.
8. Kurdjumov A.A. Vibrazia korablja [Vibration of ships]. L.: Sudpromgiz. 1961. 319p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Игоревич Притыкин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Alexej I. Pritykin, Dr. Sci.(Eng), Associate professor, Professor of the Department of shipbuilding, Kaliningrad State Technical University, Russian Federation, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.10.2021

Принята к публикации: 15.11.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.01

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.003>

Определение основных элементов и характеристик тунцеловного судна на ранних стадиях его проектирования

С.В. Дятченко¹, e-mail: svd.ks@mail.ru, О.О. Лукьянова¹, e-mail: o.o.lulkiyanova@gmail.com

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье приведены результаты статистического анализа средних тунцеловных судов, позволившие определить диапазон изменения их основных элементов, выбрать судно «прототип» и провести ряд вариационных исследований по определению влияния основных элементов тунцеловного судна (изменении расчетной длины и ширины) на его качества. Ошибочно выбранные главные размерения на ранних стадиях проектирования приводят к финансовым и временным затратам в процессе проектирования и постройки судна. В связи с этим, важно на ранних стадиях проектирования для выбора оптимальных размерений, иметь показатели качеств, для каждого из выбранных габаритов судна. Для рассматриваемых вариантов судна построены теоретические чертежи, кривые элементов теоретического чертежа и проведено их цифрование. По результатам исследований мореходных качеств (проверка остойчивости и оценка буксировочного сопротивления), а также анализа частот собственных колебаний корпуса по первому тону, при изменении расчетных длины и ширины судна, сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: промысловое судно, математическая модель, мореходные качества, остойчивость, вибрация, тунцеловное судно, теоретический чертеж, главные размерения.

Determination of the main elements and characteristics of a tuna vessel in the early stages of its design

Sergey V. Dyatchenko¹, e-mail: svd.ks@mail.ru, Olga O. Lukyanova¹, e-mail: o.o.lulkiyanova@gmail.com

¹Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a statistical analysis of medium-sized tuna vessels, which made it possible to determine the range of changes in their main elements, choose a prototype vessel and conduct a series of variational studies to determine the influence of the main elements of a tuna vessel (change in the calculated length and width) on its quality. Incorrectly chosen main dimensions in the early stages of design lead to financial and time costs during the design and construction of the vessel. In this regard, it is important at the early stages of design to select the optimal dimensions, to have quality indicators for each of the selected dimensions of the vessel. For the variants of the vessel under consideration, theoretical drawings, curves of the elements of a theoretical drawing were constructed and digitized. Based on the results of studies of seaworthiness (stability check and assessment of towing resistance), as well as analysis of the frequencies of natural vibrations of the hull by the first tone, when changing the calculated length and width of the vessel, the corresponding conclusions were drawn.

Keywords: fishing vessel, mathematical model, seaworthiness, stability, vibration, tuna boat, theoretical drawing, main dimensions.

Введение

В настоящее время средние рыбопромысловые суда составляют основную группу судов добывающего флота России и наиболее востребованы рыбопромышленными компаниями. Одним из важных объектов рыбного промысла долгие годы являлся лов тунца. Сегодня тунцеловная отрасль в России пришла в полный упадок в следствии ликвидации российского океанического промысла и принятых экологических, санитарных и экономических требований. Актуальность темы связана с эскизной проработкой новых современных судов для вылова тунца.

Главной особенностью тунца, как объекта промысла, является то, что он практически никогда не стоит на месте и находится в постоянном движении. Поэтому, одним из важных требований к тунцеловным судам, является обладание высокими показателями ходкости. Был проведен анализ основных элементов ряда средних тунцеловных судов, который представлен в табл. 1. Целью этого анализа был выбор судна прототипа, определения диапазонов изменения основных элементов и их соотношений, а также получения математических зависимостей их изменения в рассматриваемом диапазоне.

Таблица 1

Статистические данные по средним тунцеловным судам

№ п/п	Название и год постройки	L, м	B, м	H, м	T, м	M, т	G, т	V, уз	N _T	V _T , м ³	Производитель
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Средний сейнер тунцеловный типа «Тибия» пр. 1348, 1986 г.	55,53	11,1	7,50	4,55	1488	265	13	8	361	СССР
2	Тунцеловное судно типа «Нереида» пр. 502А, 1966 г.	54,20	9,30	4,70	3,59	930	97	12	2	212	СССР

3	Тунцеловное судно типа «Нора», 1956 г.	41,50	7,50	3,50	2,95	582	60	10	2	133	Япония
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	Тунцеловный сейнер типа «Jotugo», 1966 г.	55,33	9,10	4,25	3,96	1114 (DW)	-	13	-	509	Испания
5	Тунцеловный сейнер типа «Мего», 1966 г.	55,30	9,02	4,25	3,75	659 (DW)	-	13	-	555	Испания
6	Тунцеловный сейнер типа «Castero», 1964 г.	55,28	9,05	4,25	3,58	-	-	13	-	576	Испания
7	Тунцеловный сейнер типа «Emperador», 1966 г.	55,25	9,02	4,25	3,75	659 (DW)	-	12	-	555	Испания
8	Тунцеловный сейнер типа «Damego», 1966 г.	55,03	9,05	4,25	3,90	659 (DW)	-	13	-	555	Испания
9	Тунцеловный сейнер типа «Arigua», 1967 г.	52,02	9,02	4,25	3,93	670 (DW)	-	15	-	500	Испания
10	Тунцеловный сейнер типа «Atun», 1962 г.	50,05	8,11	4,14	-	-	-	11	-	-	Испания
11	Тунцеловный сейнер типа «Jaqua», 1970 г.	47,07	10,44	5,21	4,69	-	-	11	-	-	Испания

Основная часть

В ходе работы был выполнен анализ основных элементов и архитектурного исполнения современных зарубежных средних и больших тунцеловных судов, приведенных в табл.2. Установлено, что габаритные размеры современных тунцеловных судов, в основном лежат в диапазоне, от 60 до 100 м в длину и от 13 до 15 м в ширину. Учитывая современную тенденцию по увеличению

главных размерений судов этого назначения, было принято решение об увеличении расчетной длины «Тибии» в первом приближении на 5 м. Для новых размерений судна были построены кривые элементов теоретического чертежа, произведен пересчет нагрузки масс и выполнен расчет начальной посадки судна. В результате расчетов было установлено, что осадка у нового судна увеличилась до 5,11 м.

Таблица 2

Статистика современных тунцеловных судов

№ п/п	Проект судна	Страна	Год постройки	L, м	B, м
1	Galerna Lau	Испания	2019	96,12	15,0
2	Tuna vessel by SENER Ingeniería y Sistemas	Испания	2018	82,10	14,2
3	Atlantic	Норвегия	2020	64,0	14,0
4	Langøy	Норвегия	2013	75,0	15,4
5	Geir	Норвегия	2020	63,0	13,5

Далее была выполнена проверка остойчивости на соответствие требованиям Правил и классификации судов Российского морского регистра судоходства. Полученное судно удовлетворяет проверки по критерию погоды, проверки по статическому углу крена, проверки соответствия диаграмме статической остойчивости (ДСО), представленной на рис.1 и проверки начальной метацентрической высоты.

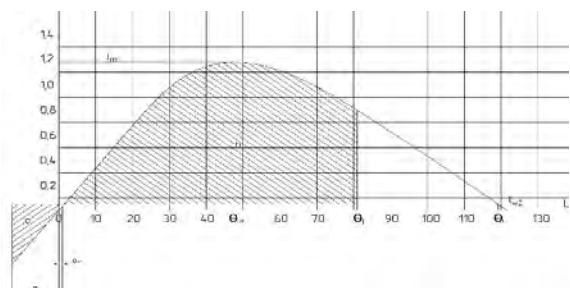


Рис.1 Диаграмма статической остойчивости судна

В ходе дальнейшей проработки, было принято решение, о необходимости выполнения расчета для афинно-увеличенного судна прототипа для еще четырех вариантов: 1 вариант: длина увеличена на 5 м, ширина – на 0,5 м; 2 вариант: длина увеличена на 10 м, ширина – на 1,0 м; 3 вариант: длина увеличена на 15 м, ширина – на 1,5 м; 4 вариант: длина увеличена на 20 м, ширина – на 2,5 м. Такое решение обосновано тем, что нет конкретного основания увеличения судна на величину, выбранную в первом приближении. Расширение размерного ряда позволит при рассмотрении мореходных качеств, а также технологичности и стоимости постройки в процессе проработки выбрать оптимальные габариты с наиболее приемлемыми характеристиками.

Для каждого варианта так же были построены теоретические чертежи и с помощью программы «Диалог-статика» выполнены расчеты кривых элементов теоретического чертежа (КЭТЧ). На рис.2 показан теоретический чертеж тунцеловного судна, на рис.3 показаны КЭТЧ

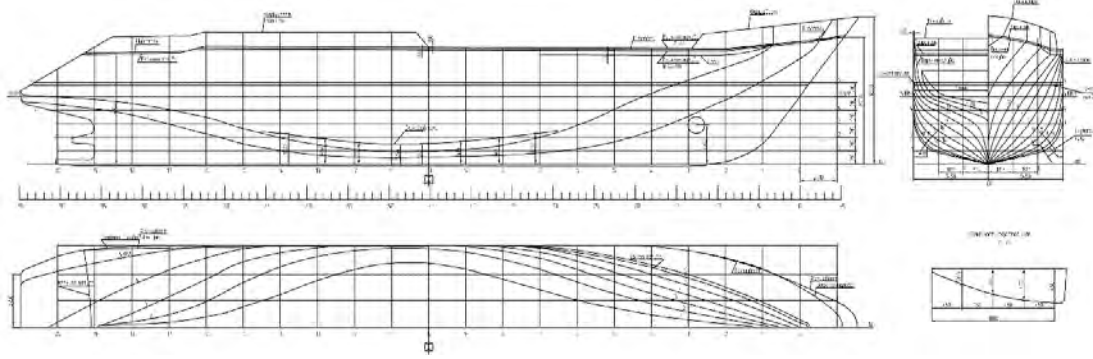


Рис.2. Теоретический чертёж туннельного судна

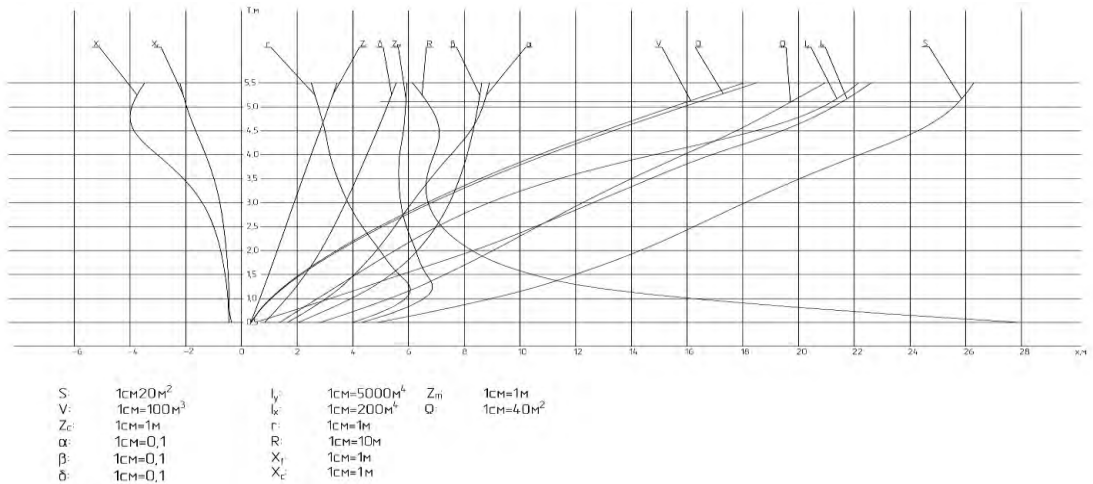


Рис.3. Кривые элементов теоретического чертежа судна, увеличенного на 5 м

По серийным диаграммам рассчитаны кривые буксировочного сопротивления на заданную скорость, в качестве которой в первом приближении принята аналогично судну-прототипу – 13 узлов, смотри рис. 4. Выполнены расчет гребного винта фиксированного шага и подбор главного двигателя и редуктора.

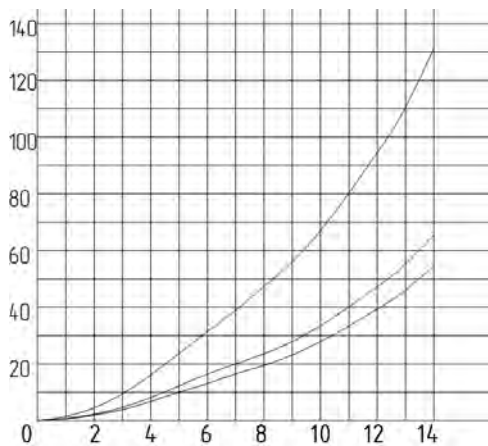


Рис.4. Кривые буксировочного сопротивления

Одной из важных проектных задач являлась разработка цифровых моделей мидель-шпангоутов для всех вариантов изменения базового теоретического чертежа судна-прототипа. На рис. 5 представлена цифровая модель шпангоутов, для увеличенного на 5 м варианта базового проекта судна, а на рис.6 3D-модель корпуса.

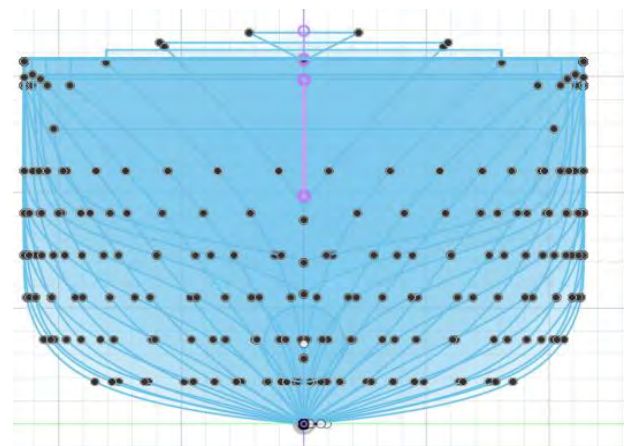


Рис.5. Цифровая модель шпангоутов для варианта изменяемого базового проекта

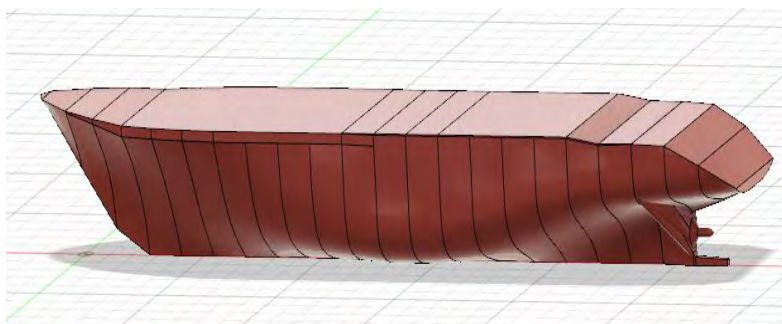


Рис. 6 3D модель корпуса тунцелового судна для варианта изменяемого базового проекта

Для каждого варианта судна была рассчитана частота вибрации 1 тона в горизонтальном и вертикальном направлении. Изменение частот с увеличением габаритов судна представлена на рисунках 7 и 8. Для принятия рационального решения о постройке судна необходимо иметь адекватную прогнозную оценку трудоемкости постройки судна.

Зная трудоемкость можно оценить примерные сроки постройки судна и стоимость, что позволит впоследствии комплексно оценивать преимущества и недостатки каждого судна рассматриваемого размерного ряда. В табл.4 приведена оценка трудоёмкости постройки судна, увеличенного на 5 м, выполненная по РД.5Р.ГКЛИ -0502-184.

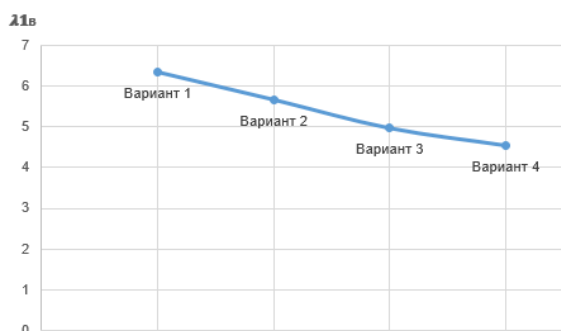


Рис. 7 График изменения частот в вертикальном направлении с увеличением габаритов судна

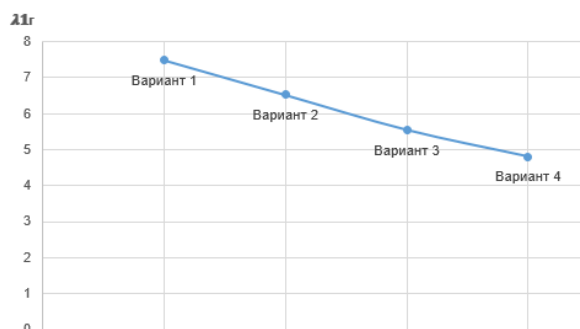


Рис. 8 График изменения частот в горизонтальном направлении с увеличением габаритов судна

Таблица 4.

Оценка трудоёмкости постройки судна

Виды работ	Масса, т	Трудоёмкость удельная по нормативу, чел-ч/т	Коеф-нт	Трудоёмкость постройки	
				Удельная расчетная, чел-ч/т	Общая, чел-ч
1	2	3	4	5	6
Обработка деталей корпуса	678,3	18,08	–	18,08	12262
Предварительная сборка	678,3	67,76	0,8-1,05	56,92	38607
Формирование корпуса	678,3	82,83	1,1	91,11	61798
Трубомонтажные работы	82,1	385,22	1,2	462,26	37952
Механомонтажные работы	145,2	94,27	1,2	113,12	16425
Достроечные работы	950,0	40,43	1,2	48,51	46084
Испытания	950,0	18,32	–	18,32	17404
Всего трудоёмкость работ	–	–	–	–	230533
МСЧ	–	20%	–	–	57633
Итого трудоёмкость постройки серийно освоенного судна	–	–	–	–	288166
Трудоёмкость постройки серийно освоенного судна с учетом Кт = 0,91	–	–	0,91	–	262231
Трудоёмкость постройки головного судна	–	–	1,7	–	445793

Заключение

Создана база данных для вариационных исследований по выбору оптимальных проектных элементов и характеристик тунцелового судна. Построены теоретические чертежи и кривые элементов теоретического чертежа.

Для рассмотренных вариантов суда, построены цифровые модели шпангоутов и выполнена проверка устойчивости на соответствие требованиям Правилам и классификации судов Российского морского регистра судоходства.

Для варианта изменяемого базового проекта построена 3D модель корпуса тунцелового судна.

По серийным диаграммам рассчитаны кривые буксировочного сопротивления на заданную скорость, в качестве которой в первом приближении принята аналогично судну-прототипу – 13 узлов.

Выполнен расчет гребного винта фиксированного шага и выполнен подбор главного двигателя и редуктора.

Выполнен оценочный расчёт трудоёмкости постройки судна.

Литература

1. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – Т.1. Описание системы «Корабль». - 819 с.
2. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – Т.2. Анализ и синтез системы «Корабль». - 812 с.
3. Маков Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 314 с.
4. Малышев А.Н. Плавучесть и остойчивость промысловых судов / А.Н. Малышев. - М.: Мир.2003. – 272 с.
5. Маслюк Е.В. Проектирование морских судов. Расчеты нагрузки масс водоизмещения порожнем судов различного назначения / Е.В. Маслюк, А.Ф. Иконников – Калининград, Изд. ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2008. - 47 с.
6. Ногид Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа / Л.М. Ногид.- Л.: Судпромгиз, 1962. – 243 с.
7. Раков А.И. Проектирование промысловых судов / А.И. Раков, Н.Б. Севастьянов.- Л.: Судостроение, 1981. - 376 с.
8. Севастьянов Н.Б. Остойчивость промысловых судов. – Л., Судостроение, 1970. - 200 с.
9. Короткин А.И. Присоединенные массы судна. Справочник. – Л.: Судостроение, 1986. – 312 с.
10. Свечников, О.И. Расчет и проектирование конструкций судов внутреннего плавания: учеб. пособие / О. И. Свечников, И.И. Троянин. – СПб.: Судостроение, 1994. – 376 с.

Referenzen

1. Gaykovich, A.I. Theory of design of displacement ships and ships, in 2 tons.Spb., Publishing House of Research Center MORINTEH, 2014, T.1., Description of the system "Ship", 819 p.
2. Gaikovich, AI Theory of design of displacement ships and ships, in 2 tons. Spb., Publishing House of Research Center MORINTEH, 2014, T.2., Analysis and synthesis of the "Ship" system, 812 p.
3. Makov Yu.L. Stability ... What is it?, SPb, Shipbuilding, 2005. 314 p.
4. Malyshev A.N. Buoyancy and stability of fishing vessels, M Mir.2003. 272 p.
5. Maslyuk E.V. Designing of sea-going ships. Calculations of the load of masses of displacement of empty vessels for various purposes. E.V. Maslyuk, A.F. Ikonnikov, Kaliningrad, Izd. FGBOU HPE "KSTU", 2008. 47 p.
6. Nogid LM Designing the vessel shape and constructing a theoretical drawing, Sudpromgiz, 1962. 243 p.
7. Rakov A.I. Design of fishing vessels, A.I. Rakov, N.B. Sevastyanov . L . Shipbuilding, 1981. 376 p.
8. Sevastianov NB Stability of fishing vessels. L., Shipbuilding, 1970 200 p.
9. Korotkin A.I. The added masses of the vessel. Directory L., Shipbuilding, 1986 312 p.
10. Svechnikov, O. I. Calculation and design of structures of inland navigation vessels: textbook. allowance SPb, Shipbuilding, 1994. 376 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Васильевич Дятченко, доктор технических наук, заведующий кафедрой кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236000, Калининград, ул. Проф. Баранова, 43, e-mail: svd.ks@mail.ru

Sergey V. Dyatchenko, Dr. Sci. (Eng.), head of the Department of Shipbuilding, Kaliningrad state technical University, ul. Prof. Baranova, 43, Kaliningrad, 236000, Russian Federation, e-mail: svd.ks@mail.ru

Ольга Олеговна Лукьянова, студент магистратуры кафедры кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236000, Калининград, ул. Проф. Баранова, 43, E-mail: o.o.lulkiyanova@gmail.com

Olga O. Lukyanova, master of the Department of Shipbuilding, Kaliningrad state technical University, ul. Prof. Baranova, 43, Kaliningrad, 236000, Russian Federation, e-mail: o.o.lulkiyanova@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 26.11.2021

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 629.5.064.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.004>

Исследование высших гармонических составляющих напряжения и тока и их влияния на функционирование судового электрооборудования

В.Ф. Белей¹, e-mail: vbeley@kigtu.ru, Г.А. Решетников¹, e-mail: gleb.reshetnikov@kigtu.ru,
К.В. Коротких¹, e-mail: kirill-korotkikh@bk.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Одним из направлений научно-технического прогресса на объектах морской индустрии является широкое использование технологий, основанных на нелинейных элементах, что позволяет значительно снизить их массогабаритные показатели и расширить их функциональные возможности. Однако применение таких технологий приводит к ухудшению качества электрической энергии, в первую очередь за счет высших гармонических составляющих напряжения и тока. В статье показана природа высших гармонических, выполнен анализ разделов «Правил классификации и постройки морских судов. 2021», российских и ряда зарубежных стандартов в области качества электроэнергии, регламентирующих уровень высших гармонических составляющих напряжения и тока в электрических сетях и системах. В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния высших гармонических составляющих на функционирование судового электрооборудования: асинхронных электродвигателей, силовых кабелей, трансформаторов, конденсаторных батарей и систем освещения. Определены выражения, позволяющие оценить это влияние. Показано, что в основном это влияние проявляется: в дополнительном нагреве электрооборудования за счет поверхностного эффекта; вибрации асинхронных электродвигателей при высоких значениях 5 и 7 гармоник напряжения судовой электрической сети.

Ключевые слова: качество электроэнергии, высшие гармоники, ток, напряжение, судовое электрооборудование, стандарты.

Research of higher harmonic components of voltage and current and their influence on the functioning of shipboard electrical equipment

Valeriy F. Beley¹, e-mail: vbeley@kigtu.ru, Gleb A. Reshetnikov¹, e-mail: gleb.reshetnikov@kigtu.ru,
Kirill V. Korotkikh¹, e-mail: kirill-korotkikh@bk.ru

¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. One of the areas of scientific and technological progress at the facilities of the marine industry is the widespread use of technologies based on nonlinear elements, which can significantly reduce their weight-size parameters and dimensions and expand their functional capabilities. However, the use of such technologies leads to a deterioration in the quality of electrical energy, primarily due to higher harmonic components of voltage and current. The article shows the nature of higher harmonics, analyzes the sections of the «Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Vessels. 2021», Russian and a number of foreign standards in the field of electric power quality, regulating the level of higher harmonic components of voltage and current in electrical networks and systems. The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the influence of higher harmonic components on the functioning of shipboard electrical equipment: asynchronous electric motors, power cables, transformers, capacitor banks and lighting systems. Formulas have been determined to assess this effect. It is shown that the influence is mainly manifested: in additional heating of electrical equipment due to the skin effect; vibrations of asynchronous electric motors at high values of 5th and 7th voltage harmonics of the ship's electrical network.

Key words: electric power quality, higher harmonics, current, voltage, shipboard electrical equipment, standards.

Введение

Широкое внедрение на объектах морской индустрии новейших электротехнологий, реализованных, как правило, на нелинейных элементах: частотно-управляемые электроприводы, светодиодное освещение и прочее, позволяет добиться значительного снижения расхода энергии и массогабаритных показателей оборудования, расширяет функциональные возможности энергетических комплексов и систем. Однако применение этих технологий приводит к искажению синусоидальности кривой напряжения, что обуславливает, значительный рост гармонических составляющих тока и напряжения в электрических сетях. Проблема осложняется тем, что фирмы-производители не всегда показывают параметры и показатели новейших электротехнологий,

характеризующих уровень эмиссии высших гармонических составляющих тока в электрическую сеть. С другой стороны, электроэнергетические системы, в том числе и объекты морской индустрии, насыщаются элементами микропроцессорных систем управления и автоматики, чувствительные к этим помехам. Поэтому выполнение комплекса исследований: от анализа нормативных документов, природы высших гармонических составляющих до определения их степени воздействия на работу судового электрооборудования, являются важными аспектами для решения данной проблемы.

1. Природа высших гармонических составляющих напряжения и тока

Появление высших гармоник (ВГ) в электрических сетях обусловлено в основном двумя причинами: несинусоидальностью кривой напряжения источника

питания рассматриваемой сети, наличием нелинейного элемента в составе сети.

При объяснении природы возникновения ВГ приняты два подхода [1].

Первый – математический, основанный на представлении несинусоидальной периодической функции в виде рядов Фурье.

$$e(t) = E_0 + E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} E_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n) \quad (1)$$

где: E_0 – постоянная составляющая; E_{nm} и ψ_n – амплитуда и фаза n-й гармоники.

Второй – энергетический на основе допущения взаимосвязи основного потока мощности и потоков мощностей на гармонических частотах.

При энергетическом подходе полагают, что нелинейный элемент в силовой цепи обладает преобразовательными свойствами. Поток энергии (P_r) (рис. 1б), поступающий от генератора (мощность этого потока определяется основной гармоникой) распределяется в цепи следующим образом. Часть мощности теряется в активных сопротивлениях источника ΔP_r и сети $\Delta P_{сети}$, основная часть этой мощности P_H поступает в нагрузку, преобразуясь в другие виды энергии. Некоторая доля мощности $\Delta P_{пп}$ в нелинейном элементе преобразуется в поток ВГ (рис. 1в). На месте нелинейного элемента появляется преобразователь в виде источника гармоник тока J_n (рис. 1в). Малая часть гармонической мощности возвращается в питающую сеть в виде мощностей $\Delta P_{сетиn}$ и $\Delta P_{Гn}$, которые рассеиваются соответственно в активных сопротивлениях сети $r_{сети}$ и генератора r_G (рис. 1в), а большая часть гармонической мощности ΔP_{Hn} потребляется в нагрузке. Так как сопротивления r_G и $r_{сети}$ соединены последовательно, то

$$\frac{\Delta P_{Hn}}{\Delta P_{сети} + \Delta P_G} = \frac{r_H}{r_{сети} + r_G} \quad (2)$$

Как правило, мы имеем дело с рядом ВГ. Поэтому для каждой из ВГ следует составить электрическую схему замещения и рассмотреть поток энергии на каждой частоте (рис. 1в).

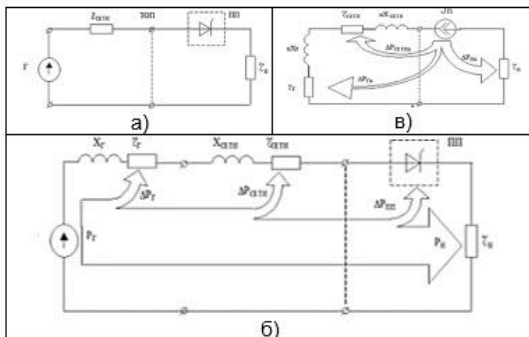


Рис. 1. Диаграммы основного и гармонических потоков мощности в системе переменного тока: а) электрическая схема однофазной сети; б) поток мощности на основной частоте. ТОП-точка общего присоединения; в) поток мощности гармонических частот

Как было показано выше, при наличии нелинейного элемента в сети имеет место эмиссия ВГ тока в питающую сеть. ВГ тока, протекая по элементам сети, вызывают на них гармонические падения напряжения. В итоге, в каждой точке рассматриваемой сети напряжение будет определяться: напряжением, подводимым от питающей сети $u_{сети}$, и суммой падений напряжений от всего спектра ВГ тока.

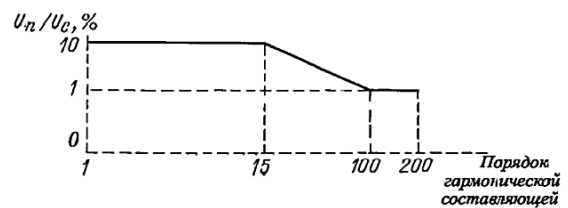
$$u = u_{сети} + \sum_{n=2}^{\infty} i_n \cdot z_n \quad (3)$$

где: z_n – гармоническое сопротивление участка цепи на частоте f_n .

2. Анализ стандартов, регламентирующих уровень высших гармонических составляющих напряжения и тока в электрических сетях

Правилами классификации и постройки морских судов [2] регламентируются.

Гармонические составляющие напряжения по цепям питания – в соответствии с графиком высших гармоник судовой сети, изображенным в логарифмическом масштабе:



где U_n , U_G – соответственно напряжения гармоники и сети

Рис. 2. Допустимые значения гармонических составляющих напряжения по цепям питания

Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой напряжения не должно превышать 8 % и определяется по формулам:

$$K_u = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{U_{p,n}}{U_{p,1}}\right)^2} \cdot 100\% \quad (4)$$

где: $U_{p,n}$ – среднеквадратичное значение напряжения подгруппы n-й гармоники;

n – порядок гармоник.

$$U_{p,n} = \sqrt{U_n^2 + \sum_{h=2}^{40} U_{c,n+h}^2}, \text{ В} \quad (5)$$

Значение K_u регламентируется для полностью укомплектованной судовой электроэнергетической системы. Для цепей систем электродвижения, непосредственно не подключенных к сети общесудовых потребителей, значение суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой напряжения не должно превышать 10 %.

Допускается использование отдельных шин с $K_U > 8\%$ для питания мощных источников гармонических составляющих напряжения и невосприимчивого к ним электрооборудования при условии, что указанные шины подключаются к основным шинам судовой сети через развязывающие устройства.

В РФ с 1967 по 2013 год введено пять стандартов, регламентирующих нормы качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения общего назначения. Стандарт 2013 г. [3] разработан с учетом стандарта ЕС EN50160 [4].

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются:

1. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в точке передачи электрической энергии:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Для данного показателя КЭ установлены следующие нормы: значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений в течение 95 % и 100 % (табл. 1) времени интервала в неделю.

Таблица 1

Значения K_U , усредненные в интервале 10 мин в течение 100 % времени в одну неделю

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
12,0	8,0	6,0	3,0

2. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ до 40-го порядка от основной гармонической составляющей (U_1) в точке передачи электрической энергии.

$$K_{U(n)} = \frac{U(n)}{U(1)} \cdot 100\% \quad (7)$$

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений для четных, нечетных (табл. 2) и гармоник кратных трем, в течение 95 % и 100% времени интервала в одну неделю [3].

Таблица 2

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения не кратных трем $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей напряжения	Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
выше 25	1,5	1	1	0,4

Стандарты ряда стран регламентируют гармоники тока. Документ «Ограничение гармоник в электрических сетях» (Финляндия) устанавливает нормы на гармоники тока, которые могут течь в линии любого потребителя, присоединенного к точке общего присоединения (табл. 3). Эти нормы выражаются в процентах от среднечасовой нагрузки (I_{cp}).

$$K_{i(n)} = \frac{I(n)}{I_{cp}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Таблица 3

Ограничения искажения кривой тока (Финляндия)

U _{ном} , кВ	Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока K_i (%)	Коэффициент n-гармонической составляющей тока $K_i(n)$
3-20	10	8
30-45	7	6
110	5	4

Стандарт Новой Зеландии регламентирует допустимые уровни гармоник тока в линиях напряжением 66-220 кВ, а стандарт Англии от одного потребителя до точки общего присоединения. Стандарты ряда стран регламентируют наибольшие допустимые значения относительной мощности полупроводниковых преобразователей ($S_{п}$) по отношению к мощности короткого замыкания $S_{кз}$ в точке подключения источника ВГ (табл. 4) [1].

Таблица 4

Допустимые значения относительной мощности преобразователей (Швеция)

Пульсность преобразователя	$S_{п}/S_{кз} \cdot 100\%$
Менее 6	0,5
6	1,0
12	2,0
Более 6	3,0

3. Результаты исследований влияния высших гармонических составляющих на функционирование судового электрооборудования

Основную часть электрооборудования электроэнергетических систем составляют асинхронные двигатели (АД), кабельные сети, трансформаторы, силовые конденсаторы, осветительные приборы.

Асинхронные двигатели.

На судах используются частотно-регулируемые электроприводы, основу которых составляют преобразователь частоты и асинхронный двигатель (ПЧ-АД), обеспечивающие высокую точность диапазона регулирования, экономию электроэнергии в случае переменной нагрузки и другое [5,6]. Как известно, наличие звена постоянного тока обуславливает эмиссию ВГ, как в цепи питания, так и в цепях АД. На рисунках 3 и 4 приведены результаты экспериментальных исследований ВГ в цепях частотного привода (рис. 2) при отсутствии нагрузки на валу АД, и при номинальной скорости вращения.

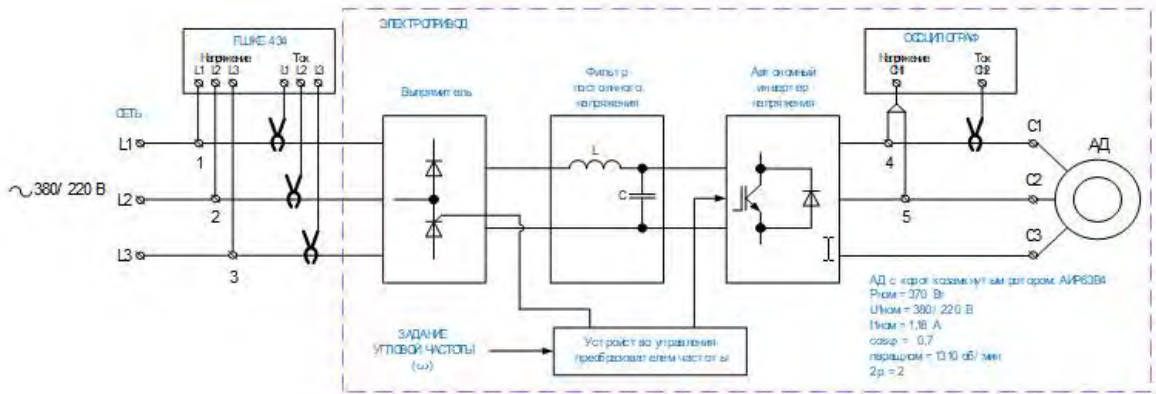


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по исследованию частотного электропривода

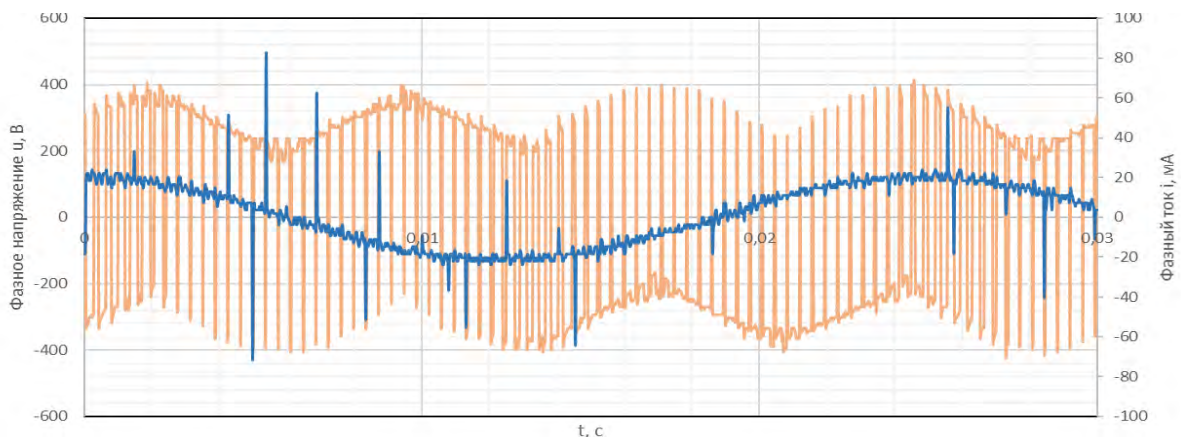
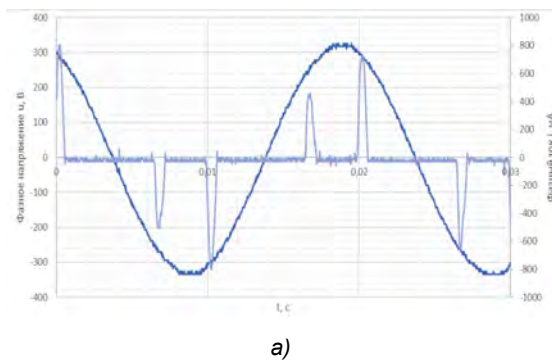


Рис. 3. Осциллограммы фазного напряжения и тока в цепи АД



а)

Величина, %	Фазный ток			Фазное напряжение		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
THD	237,5	238,0	224,8	1,2	0,9	0,9
H3	20,1	41,6	24,9	0,6	0,3	0,4
H5	89,6	97,2	101,0	0,8	0,7	0,7
H7	98,4	93,7	88,1	0,2	0,2	0,1
H9	22,8	36,4	26,6	0,3	0,2	0,2
H11	75,4	88,2	93,6	0,3	0,1	0,2
H13	91,7	81,9	70,5	0,3	0,2	0,1
H15	26,5	27,1	27,6	0,2	0,1	0,1

б)

Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения входе электропривода (а), значения ВГ тока и напряжения (б)

Анализ полученных осциллограмм, в том числе и при других режимах работы электропривода, показывает высокий уровень ВГ тока, эмитируемых в питающую сеть, преобладающими из которых являются 5, 7, 11, 13 (рис. 4б) Питающее напряжение на зажимах статора АД, формируется инвертором (рис. 2) заданной частоты и величины напряжения (погибающей) методом ШИП или ШИР (рис. 3) [5,6], что обуславливает высокий уровень ВГ для АД. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на судах рыбопромыслового флота в ряде случаев достигает 13% (РТМС типа Моонзунд) [7].

Влияние ВГ на асинхронные АД проявляется в дополнительном нагреве обмоток, старении изоляции и возникновении тормозных моментов, обусловленных ВГ обратных последовательностей и вибрации [1,8].

Добавочные потери в АД обусловлены токами n-й гармоники ($\Delta P_{доб.n}$).

$$\Delta P_{доб.n} = 3 \cdot I_n^2 \cdot (r_{1,n} + r_{2,n}') \quad (9)$$

где: $r_{1,n}$, $r_{2,n}'$ – соответственно активные сопротивления обмоток статора и ротора (приведенное) на частоте n-й гармоники; I_n – ток n-й гармоники.

При повышенных частотах в обмотках статора и ротора проявляется поверхностный эффект.

Таблица 5

Технические данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа АИР со степенью защиты IP44

P ₁ , кВт	n ₂ , об/мин	cosφ	p	I ₁ , А	η, %	r ₁ , о.е.	x ₁ ≈ z ₁ , о.е.	x _{2кк'} , о.е.	r _{2кк'} , о.е.	r _{2ст'} , о.е.	x _{2ст'} , о.е.
8,5	1460	0,86	2	14,9	88,4	0,036	0,1	0,033	0,0067	0,03	0,03

где r₁, x₁ – активное и реактивное сопротивления обмотки статора;
 r_{2кк'}, x_{2кк'} – активное и реактивное сопротивления короткозамыкающих колец, приведенный к обмотке статора;
 r_{2ст'}, x_{2ст'} – активное и реактивное сопротивления стержня ротора, приведенный к обмотке статора.

$$r_{1.n} = r_1 \sqrt{n}; \quad r_{2.n}' = r_2 \cdot \sqrt{n} \quad (10) \quad = \frac{U_n^2}{[n \cdot (x_1 + x_2')]^2 \cdot n} \cdot \frac{r_{2.n}'}{s_n}$$

В воздушном зазоре АД существует значительный спектр гармоник поля. Моменты обусловленные ВГ, действующие на ротор АД являются добавочными. К ним относят: асинхронные, синхронные, гистерезисные и реактивные [9]. Наибольшее влияние из рассматриваемых моментов оказывают на АД асинхронные моменты 5 и 7 ВГ, как наибольшие по величине и характеру воздействия [1,8,9]. Они соответственно создают моменты обратной и прямой последовательностей. Для расчета этих моментов следует знать параметры схемы замещения АД (рис. 5), которая аналогична схеме замещения для основной частоты, с заменой ее параметров для частот ВГ.

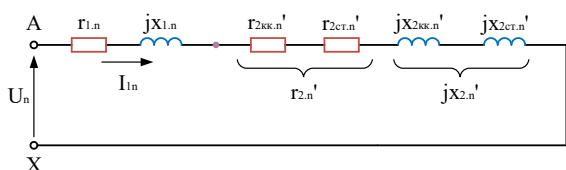


Рис. 5. Схема замещения асинхронного двигателя для ВГ

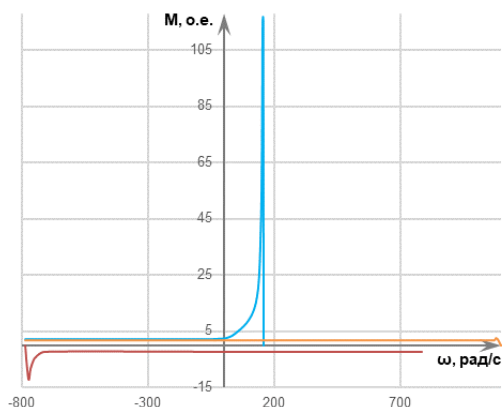


Рис. 6. Зависимости моментов первой, пятой и седьмой гармоник от угловой скорости вращения ротора рассматриваемого двигателя

На примере АД (табл. 5) проведен расчет механической характеристики на основной, 5-й (при U₅ = 0,2U₁) и 7-й (при U₇ = 0,14U₁) гармониках (рис. 6).

Приведенный к основной частоте вращающий момент n-й гармоники составит, о.е. [1]:

$$M_n = \frac{I_n^2}{n} \cdot \frac{r_{2.n}'}{s_n} = \frac{U_n^2}{z_n^2 \cdot n} \cdot \frac{r_{2.n}'}{s_n} \quad (11)$$

где: r_{2.n'} – активное сопротивление обмотки ротора на частоте n-й гармоники, приведенное к обмотке статора;

U_n – напряжение n-й гармоники;

x₁, x_{2'} – реактивные сопротивления обмотки статора и ротора (приведенное к обмотке статора).

Скольжение для n-й гармоники определяется следующим образом [9]:

$$s_n = \frac{\omega_{c.n} - \omega_p}{\omega_{c.n}} \quad (12)$$

где: ω_{c.n} – синхронная угловая скорость вращения n-й гармоники;

ω_p – угловая скорость ротора двигателя в номинальном режиме.

Зависимость моментов основной, 5-й и 7-й гармоник от угловой скорости приведена на рис. 6. Значения моментов для 5-й и 7-й гармоник увеличены в 100 раз для наглядности характеристики. Так как значение скольжения для токов всех гармоник практически одинаково, относительные вращающие моменты малы, тем самым их влияние на средний момент незначительно. Однако это приводит к появлению значительной вибраций вала двигателя на частоте 6-й гармоники [1].

Кабельные линии. Судовые электроэнергетические системы отличаются большим количеством кабельных линий, работающих с изолированной нейтралью. Основные формы воздействия ВГ на кабельные линии: воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимального значения амплитуды и нагрев в токопроводящих жилах.

В кабелях напряжением до 1кВ можно пренебречь выделением тепловой энергии в изоляции за счет диэлектрических потерь, которые малы при напряжении до 35 кВ [11].

При протекании несинусоидального тока по фазным жилам кабеля потери в нем определяются по выражению:

$$P_{\text{фаз.n1}} = I_1^2 \cdot r_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot r_n \quad (13)$$

где: I₁ – действующее значение тока основной частоты;

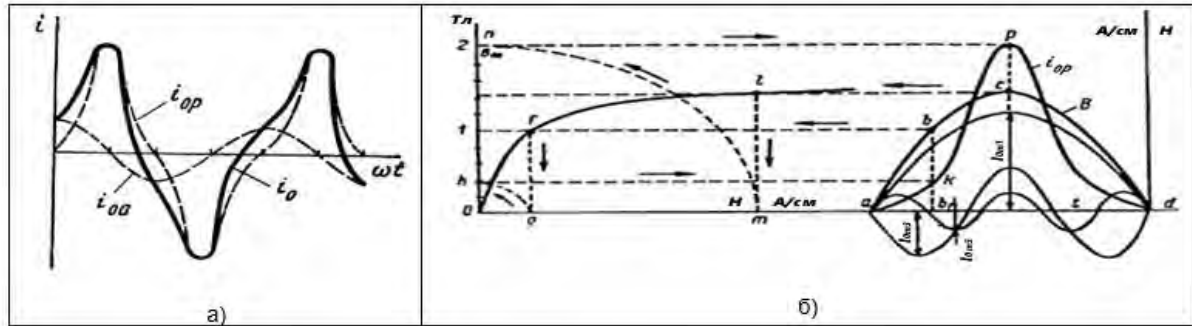


Рис. 7. Составляющие тока холостого хода (а) и анализ реактивной составляющей тока холостого хода (б) однофазного трансформатора

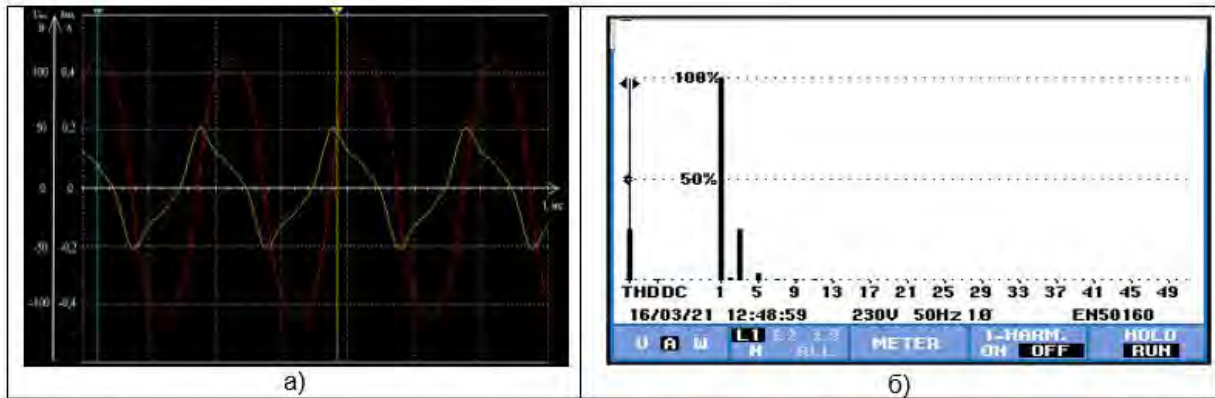


Рис. 8. Осциллограммы напряжения и тока (а) и уровень гармоник тока ($k_1 = 25,4\%$; $k_3 = 25,3\%$; $k_5 = 3,4\%$; $k_7 = 0,7\%$; $k_9 = 0,61\%$; $k_{11} = 0,55\%$) (б) однофазного распределительного трансформатора

r_1 – активное сопротивление на основной частоте;
 r_n – активное сопротивление на частоте гармоники.

Активное сопротивление жилы на n -й гармонике (r_n) при $n \geq 3$ рассчитывается согласно [11]:

$$r_n = r_1(0,0187 + 0,532 \cdot \sqrt{n}) \quad (14)$$

Трансформаторы. Гармоники напряжения сети вызывают в трансформаторах: увеличение потерь на гистерезис; потерь, связанных с вихревыми токами в стали и потери в обмотках. Также сокращается срок службы изоляции.

Потери активной мощности от токов ВГ определяются согласно [8]:

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2}^n I_{nT}^2 \cdot r_K \cdot k_{nT} \quad (15)$$

где: I_{nT} – ток n -й гармоники; r_K – сопротивление короткого замыкания; k_{nT} – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления обмоток для ВГ вследствие поверхностного эффекта и влияния эффекта близости. Для силовых трансформаторов $k_5 = 2,1$; $k_7 = 2,5$; $k_{11} = 3,2$; $k_{13} = 3,7$.

Удельные потери (p) в магнитопроводе при других индукциях (B) и частотах можно с достаточной для практических целей определить согласно [13].

$$p = p_{1,0} \cdot B^2 \cdot \frac{f^{1,3}}{50} \quad (16)$$

Трансформаторы сами являются источниками ВГ тока, что следует учитывать. Ток холостого хода трансформатора: имеет активную (i_{0a}) составляющую, обуславливающую потери в стали; реактивную (i_{0p}), определяющую индукцию и магнитный поток в сердечнике трансформатора (рис. 7а). В однофазном трансформаторе реактивная составляющая тока холостого хода несинусоидальна вследствие насыщения магнитопровода трансформатора, что и обуславливает эмиссию ВГ тока в электрическую сеть (рис. 7б) [1,12].

На основе экспериментальных исследований однофазного распределительного трансформатора были получены осциллограммы напряжения и тока холостого хода при $U=1,1U_{ном}$, представленные на рис. 8а, а гармонические составляющие тока холостого хода представлены на рис. 8б.

При соединении трехфазного трансформатора по схеме треугольник-звезда с нулевым проводом утроенный ток третьей гармоники циркулирует по обмотке, соединенной в треугольник, что вызывает в ней дополнительные потери.

Силовые конденсаторы. Дополнительные потери в конденсаторах определяются согласно [8]:

$$\Delta P_{доп} = \sum_{n=2}^{40} \Delta p_0 \cdot \omega \cdot C \cdot n \cdot U_n^2 \quad (17)$$

где: Δp_0 – удельные потери на основной частоте, Вт/Вар;
 C – емкость;
 U_n – напряжение n-гармоники.

Эти потери приводят к дополнительному нагреву конденсаторов. Поэтому конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности проектируют так, чтобы они выдерживали перегрузку, обусловленную токами ВГ. В США – 80%, в РФ – 30%. Для получения исходных данных, следует провести исследование ВГ (рис. 9).

В таблице 6 приведены результаты обработки осциллограмм линейных токов и напряжений (рис. 10).

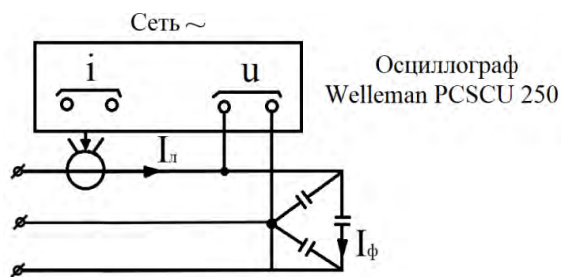


Рис. 9. Лабораторная установка для исследования влияния ВГ на конденсаторы

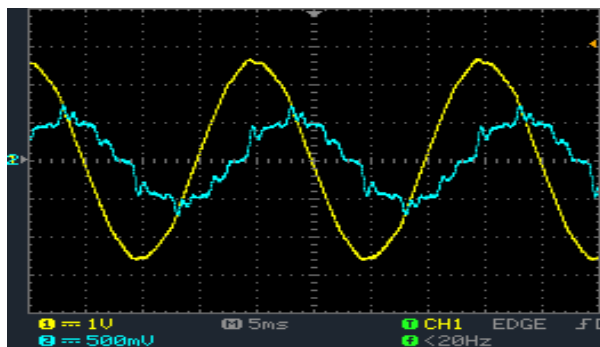


Рис. 10. Осциллограммы линейных токов и напряжений

Таблица 6
Результаты обработки осциллограмм линейного тока и напряжения в цепи конденсаторной батареи

Гармонический состав напряжения			
Величина, %	L1	L2	L3
THD	1,6	1,7	1,6
H3	0,2	0,2	0,4
H5	0,9	0,9	0,7
H7	0,9	1,0	1,0
H9	0,1	0,2	0,1
H11	0,7	0,7	0,7
H13	0,3	0,3	0,3
Гармонический состав тока			
Величина, %	L1	L2	L3
THD	14,1	16,7	15,9
H3	0,9	0,1	1,2
H5	4,4	4,3	3,6
H7	6,4	6,9	7,4
H9	0,6	1,1	0,8
H11	7,8	8,5	7,7
H13	3,4	4,0	4,9

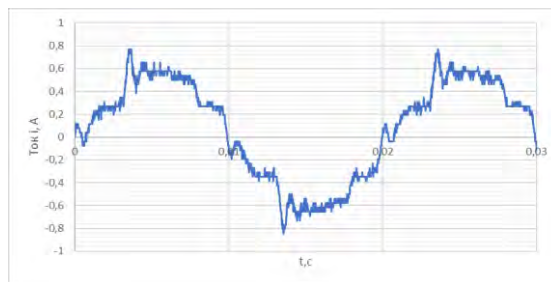


Рис. 11. Осциллограмма фазного тока 0,6 А конденсаторной батареи

Результаты исследований конденсаторной батареи емкостью 30 мкФ приведены на рис. 10 и 11, а также в табл. 7 и 8.

Таблица 7
Результаты обработки осциллограммы фазного тока 0,6 А конденсаторной батареи

Величина, %	L1	L2	L3
THD	12,7	12,7	12,7
H3	0,6	0,6	0,6
H5	4,4	4,4	4,4
H7	6,5	6,5	6,5
H9	0,8	0,8	0,8
H11	8,7	8,7	8,7
H13	4,7	4,7	4,7
H15	2,1	2,1	2,1

$$THD \equiv K_U \quad (18)$$

Таблица 8
Результаты измерений мощностей, токов в цепи конденсаторной батареи при $U_{\text{СЕТИ}} = 180В$

Параметры	L1	L2	L3
S, кВА	0,12	0,12	0,12
P, кВт	0,04	0,04	0,04
Q, кВАр	0,11	0,11	0,11

Анализ полученных данных свидетельствует о протекании третьих и кратных им гармоник по двум линейным проводам и резкому увеличению ВГ тока вследствие уменьшения сопротивления конденсатора на частотах ВГ. Уровень гармоник тока также позволяет рассчитать токовую перегрузку конденсаторов.

Влияние ВГ на осветительные приборы.

На световой поток осветительных приборов оказывают воздействие низкочастотные колебания, оценка которых осуществляется через показатель качества электроэнергии – доза фликера. Кратковременная доза фликера (Pst) не должно превышать 1,38; и длительная доза фликера должна быть не более 1,0.

Доза колебаний напряжения (ψ) – интегральная характеристика колебаний напряжения, вызывающих у человека накапливающееся за установленный период времени раздражение миганиями света [14,15]:

$$\psi = \frac{1}{\theta} \cdot \int_{t-\theta}^t dt \int_0^{25} g_f^2 \cdot S(f, t) \cdot df \quad (19)$$

где: g_f – коэффициент приведения размахов изменения напряжения к эквивалентным;
 θ – интервал времени усреднения;
 $S(f, t)$ – частотный спектр процесса изменения напряжения.

Источником фликера в судовой электроэнергетической системе являются электроприемники, характеризующиеся импульсным, нелинейным и резкопеременным характером потребления активной и реактивной мощности. Доказано, что колебания яркости осветительных приборов вызывают нежелательные воздействия на мозг человека. Наиболее неблагоприятны колебания, происходящие с частотой 8,767 Гц, совпадающие с частотой колебаний нервных клеток головного мозга.

Использование световых приборов на основе светодиодов и электронного блока позволяют обеспечить низкие пульсации светового потока и, следовательно, величины дозы фликера, значительно ниже приведенных в стандарте на ПКЭ [3,4]. Таким образом, исключается влияние ВГ на данный осветительный прибор. Однако, схемы осветительных приборов ряда фирм не обеспечивают вышеизложенные требования при высоком уровне низкочастотных колебаний в сети.

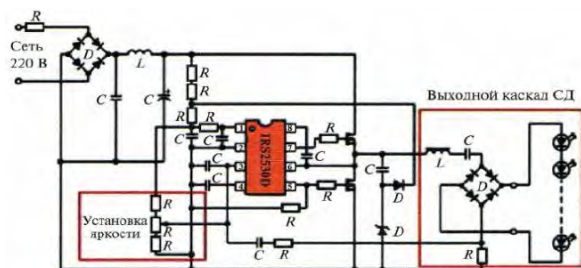


Рис. 12. Электрическая схема питания СД ламп с коррекцией мощности

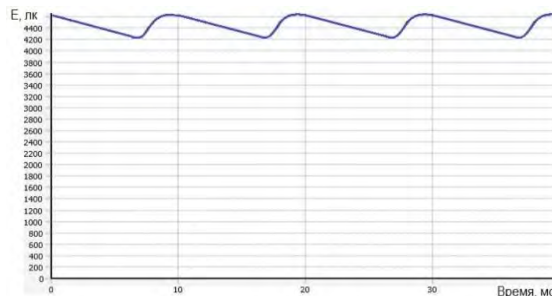


Рис. 13. Осциллограммы пульсаций освещенности для СД лампы Philips мощностью 11,5 Вт ($K_L = 4,6\%$);

Заключение

Проведен анализ природы и нормативных документов в отношении уровня высших гармонических составляющих напряжения в электрических сетях. Показана актуальность формирования правовой базы по эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть, в связи с ростом нелинейных нагрузок. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния высших гармонических составляющих напряжения и тока на функционирование основного судового электрооборудования: асинхронные двигатели, кабели, трансформаторы, силовые конденсаторы и осветительные приборы. Показаны выражения, позволяющие оценить это влияние. Установлено, что в основном это влияние проявляется: в дополнительном нагреве электрооборудования за счет поверхностного эффекта; вибрации асинхронных электродвигателей при высоких значениях 5 и 7 гармоник напряжения судовой электрической сети.

Литература

1. Арриллага Дж., Брэдли Д., Броджер П. Гармоники в электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I. Классификация: утв. и введен в действие от 1 января 2021. № 2-020101-138. разработ. ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, 2021. – 111 с.
3. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. : утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по тех. регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введ. впервые : дата введ. 2014-07-01 / разработ. ООО «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». - М.: Стандартинформ, 2014, 19 с.
4. EN50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. 2010, 34 p.
5. Шабалин Л.Д., Чушанков Д.Ю. Обоснование модернизации судовых электроприводов грузоподъемных устройств на системы с использованием преобразователей / Л.Д.Шабалин, Д.Ю.Чушанков // Известия КГТУ. – Калининград. 2016. – №42, 213-222 с.
6. Белей В.Ф., Никишин А.Ю., Паршина В.Ф., Шабалин Л.Д. Энергосберегающие технологии в системах электроснабжения: учебное пособие для вузов. Под. ред. Белей В.Ф. - Калининград: Издательство КГТУ, 2021. – 102 с.
7. Белей В.Ф. Научное обоснование методов повышения эффективности электротехнических комплексов и систем // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. - МАМИ, 2004. – 48 с.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятия. М.: Энергоатомиздат, 1974. – 160 с.
9. Копылов И.П. Электрические машины. учеб. пособие для вузов. - Москва: Логос; 2000. – 607 с.
10. Kostic M. Equivalent circuit and induction motor parameters for harmonic studies in power networks / Kostic M.// Research Gate: электронный научный журнал. – 2012 [Электронный ресурс]. – URL:

https://www.researchgate.net/publication/259339771_Equivalent_Circuit_and_Induction_Motor_Parameters_for_Harmonics_Studies_in_Power_Networks (дата обращения: 13.10.2021).

11. Бершадский И.А., Якимишина В.В., Наглюк Е.Я. Влияние несинусоидальности и несимметрии четырехпроводной сети непромышленных потребителей на снижение пропускной способности кабелей // Вестник Донецкого национального техн. университета. №2(20). 2020. 18-25 с.
12. Либкинд М.С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. – М.: АН СССР, 1962. – 112 с.
13. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3 частях. Ч.1. Введение, трансформаторы. М.: Энергия. 1974. – 240 с.
14. Белей, В.Ф. Светодиодные лампы в системах судового освещения: вопросы электромагнитной совместимости / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Вестник МГТУ. 2016. Т.19. № 4. – 687-696 с.
15. Белей В.Ф., Харитонов М.С. Оценка фликера в системах электроснабжения при использовании светодиодных источников света/ Белей В.Ф., Харитонов М.С.// Промышленная энергетика - Калининград.:2017, № 9, 56-59 с.

References

1. Arrilaga J., Bradley D., Bodger P. Garmoniki v elektricheskikh sistemakh [Power systems harmonics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 320 p.
2. Pravila Klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' I. Klassifikatsiya [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification]. St. Petersburg, Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva Publ., 2021, 111 p.
3. State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p. (In Russian).
4. EN50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. 2010, 34 p.
5. Shabalin L.D., Chushankov D.Yu. Obosnovaniye modernizatsii sudovykh elektroprivodov gruzopod"yemnykh ustroystv na sistemy s ispol'zovaniyem preobrazovateley [Justification of modernization of ship electric drives of lifting devices for systems using converters]. Kaliningrad, Izvestiya KSTU Publ., №42, 2016, 213-222 p.
6. Beley V.F., Nikishin A.Yu., Parshina V.F., Shabalin L.D. Energoberegayushchiye tekhnologii v sistemakh elektrosnabzheniya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Energy-saving technologies in power supply systems: a textbook for universities]. Beley V.F. ed., Kaliningrad, Publishing house of KSTU, 2021, 96 p.
7. Beley V.F. Nauchnoye obosnovaniye metodov povysheniya effektivnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem [Scientific substantiation of methods for increasing the efficiency of electrical complexes and systems]. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, MAMI Publ., 2004, 48 p.
8. Zhezhelenko I.V. Vysshiyе garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiya [Higher harmonics in power supply systems of an industrial enterprise]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1974, 160 p.
9. Kopylov I. P. Elektricheskiye mashiny. uchebnoye posobiye dlya vuzov [Electric machines. textbook for universities]. Moscow, Logos Publ., 2000, 607 p.
10. Kostic M. Equivalent circuit and induction motor parameters for harmonic studies in power networks. 2012, available at:
https://www.researchgate.net/publication/259339771_Equivalent_Circuit_and_Induction_Motor_Parameters_for_Harmonics_Studies_in_Power_Networks (Accessed: 13 October 2021).
11. Bershadsky I.A., Yakimishina V.V., Naglyuk E.Ya. Vliyaniye nesinusoidal'nosti i nesimmetrii chetyrekhprovodnoy seti nepromyshlennykh potrebiteley na snizheniye propusknoy sposobnosti kabeley [Influence of non-sinusoidality and asymmetry of a four-wire network of non-industrial consumers on a decrease in cable throughput]. Vestnik Donetsk National Tech. University Publ., no 2(20), 2020, 18-25 p.
12. Libkind M.S. Vysshieyе garmoniki, generiruyemye transformatorami [Higher harmonics generated by transformers]. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1962, 112 p.
13. Petrov G.N. Elektricheskiye mashiny. V 3 chastyakh. CH1. Vvedeniye, transformatory. [Electric machines. In 3 parts, part 1, introduction, transformers.], Moscow, Energiya Publ., 1962, 112 p.
14. Beley, V.F. Svetodiodnyye lampy v sistemakh sudovogo osveshcheniya: voprosy elektromagnitnoy sovmestimosti [LED lamps in marine lighting systems: electromagnetic compatibility issues]. Beley V.F., Kharitonov M.S., Vestnik MGTU Publ., vol 19, no 4, 2016, 687-696 p.
15. Beley V.F., Kharitonov M.S. Otsenka flikera v sistemakh elektrosnabzheniya pri ispol'zovanii svetodiodnykh istochnikov sveta [Evaluation of flicker in power supply systems using LED light sources]. Beley V.F., Kharitonov M.S., Promyshlennaya energetika Publ., Kaliningrad, no 9, 2017, 56-59 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Феодосиевич Белей, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley, Dr.Sci.(Eng), professor, head of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovietskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Глеб Александрович Решетников, аспирант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: gleb.reshetnikov@klgtu.ru

Gleb A. Reshetnikov, Graduate student of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: gleb.reshetnikov@klgtu.ru

Кирилл Викторович Коротких, магистрант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kirill-korotkikh@bk.ru

Kirill V. Korotkikh, Master Degree student of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: kirill-korotkikh@bk.ru

Поступила в редакцию: 15.09.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

Анализ частиц продуктов износа в отработанных судовых моторных маслах

Н.Я. Синявский¹, e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, А.М. Иванов¹, e-mail: ridlerg@mail.ru,
Н.А. Кострикова¹, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В данной статье предпринята удачная попытка комплексирования магнитооптического метода и метода фотонной корреляционной спектроскопии для регистрации ферромагнитных частиц продуктов износа дизельного двигателя и определения их дисперсных характеристик. Такой подход позволяет фиксировать низкое содержание магнитных наноразмерных частиц и их дисперсность в отработанном судовом моторном масле, является новым и решает актуальную задачу. Выполнены эксперименты по наблюдению продольного магнитооптического эффекта Фарадея в модельной магнитной жидкости и в отработанном моторном масле. Показано, что низкая концентрация магнитных частиц в отработанном масле не позволяет наблюдать в нем эффект вращения плоскости поляризации в магнитном поле. Для измерения крупных частиц износа, смытых с фильтрующего элемента масляного фильтра, использовались закономерности процесса осаждения частиц в растворе и регистрация поглощения света, изменяющегося со временем. Полученные результаты позволяют получать важную информацию о состоянии и неисправностях деталей и механизмов двигателя по содержанию частиц износа в отработанном масле.

Ключевые слова: судовые моторные масла, диагностика, динамическое рассеяние света, седиментация, эффект Фарадея

Analysis of wear particles in used marine engine oils

Nikolai Ya. Sinyavsky¹, e-mail: nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, Andrei M. Ivanov¹, e-mail: ridlerg@mail.ru,
Natalya A. Kostrikova¹, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

¹Kaliningrad state technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. In this article, a successful attempt has been made to combine the magneto-optical method and the method of photon correlation spectroscopy to register ferromagnetic particles of diesel engine wear products and determine their disperse characteristics. This approach makes it possible to record a low content of magnetic nanosized particles and their dispersion in used marine engine oil, is new and solves an urgent problem. Experiments on observation of the longitudinal magneto-optical Faraday effect in a model magnetic fluid and in used engine oil have been carried out. It is shown that the low concentration of magnetic particles in the waste oil does not allow observing the effect of rotation of the plane of polarization in a magnetic field. To measure large wear particles washed away from the filter element of the oil filter, we used the regularities of the process of particle sedimentation in solution and the registration of light absorption that changes over time. The results obtained make it possible to obtain important information on the condition and malfunctions of engine parts and mechanisms by the content of wear particles in the used oil.

Keywords: marine engine oils, diagnostics, dynamic light scattering, sedimentation, Faraday effect

Введение

Отработанное моторное масло можно рассматривать как средство диагностики двигателя, поскольку масло несет с собой частицы, образующиеся при контакте с износом. Анализ отработанного моторного масла дает критически важную информацию [1] о состоянии двигателя. Типичные тесты для анализа качества масла включают использование спектрографа, который обнаруживает и измеряет определенные элементы в образце; феррограф, который с помощью магнитного поля сортирует железосодержащие частицы износа по размеру, различные средства измерения pH и вязкости [2]. В то же время традиционные способы анализа масла могут предоставить результаты исследований в течении недель, такая не оперативность может усугубить неисправности продолжающего работать двигателя. Актуальным остается поиск новых методов [3] экспресс-анализа отработанного судового моторного масла с целью диагностики двигателя.

Анализ отработанного масла может предоставить информацию и выявить проблемы, связанные с утечками охлаждающей жидкости, проблемами топливной системы, перегревом, загрязнениями, вызванными износом деталей. Каждая проблема оставляет след в отработанном

масле: повышенный уровень железа, алюминия и хрома указывает на износ цилиндра и возможные задиры поршня, поскольку многие поршни сделаны из этих металлов. Высокие уровни свинца и меди вместе, с повышенным содержанием олова или без него, предполагают износ подшипников. Ненормальные режимы износа, такие как коррозия, истирание, растрескивание и т. д., вызывают повышение концентрации металлов в масле.

Существенный вклад в истирание трущихся поверхностей двигателя вносит сажа [4]. Сажа (атомарный углерод) образуется в дизелях и является продуктом неполного сгорания дизельного топлива. Сажа может скапливаться до аномальных уровней. Циркуляция сажи приводит к образованию отложений на деталях двигателя. Большое количество сажи приводит к образованию нагара, плотность и абразивные свойства которого выше, чем у сажи и который представляет еще большую опасность для двигателя.

Об износе двигателя говорит уже 3-5% уровень ее содержания в отработанном масле. Чем больше частицы сажи, тем больше эффект полировки деталей. Агрегация приводит к росту частиц сажи от 20 нм до 300 нм. Особенно сильно сажа приводит к износу деталей, расположенных в верхней части двигателя и недостаточно смазываемые маслом, особенно во время холодных пусков. Поршневые

кольца, стенки цилиндра и клапанный механизм тоже страдают от износа, связанного с накоплением сажи. Клапанный механизм наиболее уязвим еще и потому, что возвратное поступательное движение создает разрывы масляной пленки.

Вместе с увеличением содержания сажи увеличивается и коэффициент трения. Загрязнение сажей увеличивает вязкость масла. Это приводит к снижению КПД, увеличению расхода топлива и увеличению выбросов в атмосферу. Масляная пленка оказывается тоньше, чем размеры частиц сажи.

Для решения диагностических задач с дизельными двигателями нужны измерения концентрации частиц, их дисперсности и идентификация их материала. Из-за малого размера частиц продуктов износа отработанное дизельное масло представляет собой коллоидную систему. Вредным явлением является коагуляция частиц, приводящая к увеличению их размеров. Проблема коагуляции частиц в масле в значительной степени решается за счет использования пакетов присадок. Они диспергируют сажу и не дают слипаться ее частицам друг с другом и с молекулами масла. Диспергирование частиц во взвешенное состояние улучшает качество масла, но повышать дальше содержание дисперсантов нельзя, т.к. это приводит к коррозии деталей в двигателе.

Интенсивное истирание деталей сопровождается чрезмерным накоплением продуктов износа в моторном масле. Большинство наиболее критических поверхностей в двигателе – это черные металлы, и они являются источником ферромагнитных частиц. Для идентификации частиц ферромагнитного железа и отличия их от алюминия, меди или латуни могут использоваться сильные магниты. Однако, в отличие от железа и стали, оксид железа (ржавчина) и высоколегированная сталь (например, нержавеющая сталь) слабо притягиваются магнитным полем. И наоборот, известно, что некоторые соединения цветных металлов, такие как никель, кобальт и определенная керамика, обладают сильным магнитным притяжением.

1. Методика экспериментальных исследований

Образцами для исследования служили отработанное моторное масло М-1045, смыв с масляного фильтра в растворе Нефрас С2-80/120 и модельная магнитная жидкость. Магнитная жидкость готовилась из порошка картриджа лазерного принтера. Этот порошок содержит, в том числе, и магнетит, размеры частиц которого менее 10 нм. Порошок смешивался с чистым маслом М-1045 и полученная магнитная жидкость разбавлялась растворителем Нефрас для прохождения лазерного луча. Для наблюдения эффекта Фарадея использовался соленоид, постоянное магнитное

$$\frac{n}{n_0} = \frac{e^{h/\alpha}}{\alpha(e^{1/\alpha}-1)} + 16\alpha^2 \pi e^{\frac{2h-\tau}{4\alpha}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha m^2 \pi^2 \tau} m \left(1 \mp e^{-\frac{1}{2\alpha}}\right) [\sin(m\pi h) + 2\pi m \alpha \cos(m\pi h)]}{(1+4\pi^2 m^2 \alpha^2)^2} \quad (3)$$

где $h = \frac{z}{L}$ ($0 \leq h \leq 1$); $\alpha = \frac{A}{BL}$; $\beta = \frac{L}{B}$; $\tau = \frac{t}{\beta}$; знак “-” для четных значений m и знак “+” для нечетных, ρ_p – плотность материала частиц, ρ_l – плотность жидкости.

поле которого было направлено вдоль лазерного луча. Величина индукции постоянного магнитного поля была равна $B=1.6 \cdot 10^{-3}$ Тл. Вращение плоскости поляризации фиксировалось с помощью поляризационного фильтра. Для измерения интенсивности прошедшего и рассеянного света использовался фотомножитель. Зависимость для уменьшающейся в процессе седиментации плотности рассеивающих частиц находилась с помощью теории Мейсона-Уивера. Динамическое рассеяние света от исследуемых образцов изучалось с помощью установки Photocor-FC.

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Изучение слитого отработанного масла при его замене не вполне отражает состав частиц продуктов сгорания и износа деталей двигателя, т.к. самые крупные частицы остаются на фильтрующем элементе масляного фильтра. По этой причине мы для исследования сделали смывы с его фильтрующего элемента масляного фильтра.

Смыв продуктов износа производился растворителем Нефрас С2-80/120, плотность которого 700 кг/м^3 . Крупные частицы и низкая вязкость растворителя ($\mu=0.67 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$) не позволяют измерить дисперсность частиц методом динамического рассеяния света из-за явления седиментации. Малопрозрачный раствор сразу после взбалтывания становится визуально прозрачным после осаждения частиц примерно через 60 минут. Частицы сажи имеют плотность меньшую, чем плотность растворителя и не должны осаждаться. Очевидно сажа образует агломераты с частицами металла и нагара, имеющими большую плотность и оседающими в растворителе. Интенсивность света, прошедшего через кювету с образцом меняется с течением времени, т.к. в месте прохождения светового луча меняется концентрация частиц.

Осаждение и диффузию частиц в растворе под действием гравитационного поля описывает дифференциальное уравнение Мейсона-Уивера [5]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = A \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - B \frac{\partial n}{\partial z} \quad (1)$$

здесь n – концентрация частиц. Решение уравнения предполагает начальное условие: при $t=0$, $n=n_0=const$ и граничные условия для $z=0$ и $z=L$:

$$A \frac{\partial n}{\partial z} = Bn, \quad (2)$$

что следует из требования отсутствия потока частиц через верх и низ измерительной ячейки (через боковые стенки поток также равен нулю). Уравнение (1) предполагает независимое осаждение частиц в растворе. Точное аналитическое решение уравнения Мейсона-Уивера (1) получено [5] в виде:

Также обозначено: $A = \frac{kT}{6\pi\mu a}$, $B = \frac{2g(\rho_p - \rho_l)a^2}{9\mu}$, a – радиус сферической частицы, L – глубина столба жидкости, $z=0$ – положение поверхности жидкости, μ – вязкость жидкости.

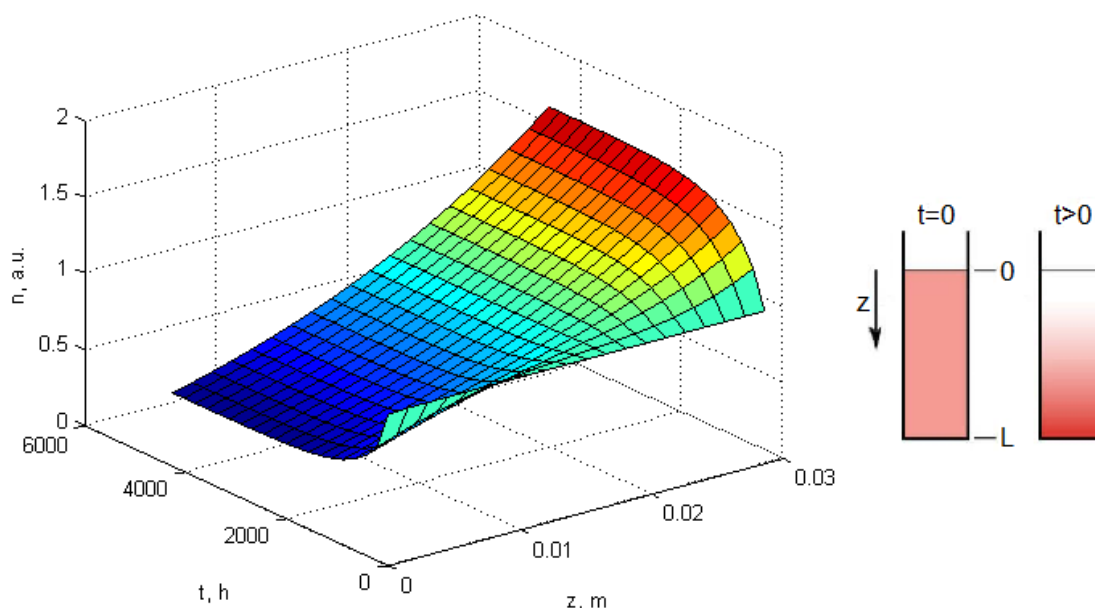


Рис. 1. Зависимость концентрации частиц от времени и от глубины в жидкости в процессе седиментации.

Изменение концентрации со временем и по высоте кюветы в процессе седиментации иллюстрирует рис. 1. ЗМ – график, приведенный на этом рисунке, получен при $a = 15 \text{ нм}$, $\rho_p = 2000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_l = 700 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0.343 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $L = 0.03 \text{ м}$, $m = 40$, $T = 296 \text{ К}$.

Согласно закону поглощения света, интенсивность при прохождении в среде уменьшается как:

$$I = I_0 \exp(-knl), \quad (4)$$

где k – определяется типом вещества и длиной волны, n – концентрация поглощающего свет вещества, l – путь, прошедшей светом. Чистый растворитель Нефрас практически не поглощает свет с длиной волны $\lambda = 633 \text{ нм}$. Величины k и l – константы и учитывать следует только изменяющуюся со временем концентрацию частиц.

Варьируя параметр a в решении уравнения Мейсона-Уивера при $z=l$ (где l – глубина кюветы, на которой измеряется интенсивность проходящего света) и добиваясь минимального среднеквадратичного отклонения расчетной зависимости $I(t)$ от экспериментальной можно найти средний радиус частиц. Оценка дает усредненный эффективный радиус частиц во взвеси $a = 157 \pm 5 \text{ нм}$. При этом предполагалось, что во взвеси оседают частицы железа ($\rho_p = 7800 \text{ кг/м}^3$).

Наблюдение эффекта Фарадея было осуществлено с модельной магнитной жидкостью и с отработанным маслом М-1045. Вращение плоскости поляризации фиксировалось с помощью поляризационного фильтра. Полученные экспериментальные зависимости для модельной магнитной жидкости, для случаев, когда $B=0$ и $B=1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ приведены на рис.4. Кривые аппроксимированы функцией, соответствующей закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2(\varphi - \varphi_0) \quad (5)$$

Величина поворота плоскости поляризации в поле с индукцией $B=1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ составила $\Delta\varphi = 15 \pm 6$ град.

При поляризации луча лазера перпендикулярно плоскости рассеяния, рассеяние – изотропно. В случае поляризации лазерного луча параллельно плоскости рассеяния, рассеяние анизотропно. Максимально рассеяние при $\theta = 0$ и 180 град, в направлении $\theta = 90$ град рассеяние отсутствует. Для случая рассеяния, показанного на рис. 4, поляризация лазерного излучения произвольно ориентирована по отношению к плоскости рассеяния.

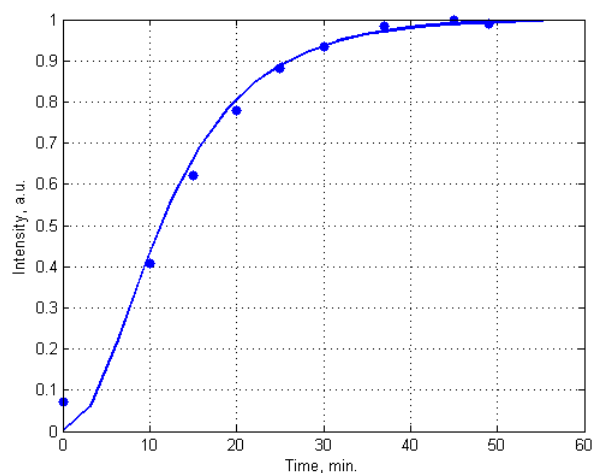


Рис. 2. Изменение интенсивности света, проходящего через кювету (экспериментальные точки) после ее интенсивного взбалтывания и кривая, полученная из решения уравнения Мейсона-Уивера.

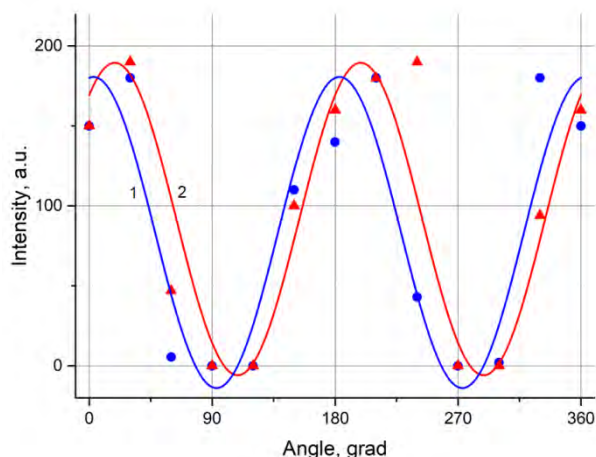


Рис. 3. Эффект Фарадея для магнитной жидкости: изменение интенсивности проходящего через кювету поляризованного света при изменении угла поворота анализатора, 1 – $V=0$, 2 – $V=1.6 \cdot 10^{-3}$ Тл.

В этом случае в зависимости (5) появляется постоянная составляющая I_n и аппроксимация экспериментальных зависимостей производилась функцией

$$I = I_n + I_0 \cos^2(\varphi - \varphi_0) \quad (6)$$

Полученная при этом величина поворота плоскости поляризации $\Delta\varphi = 6 \pm 4$ град, т.е. практически отсутствует (на уровне погрешности эксперимента). Объяснить это можно низкой концентрацией ферромагнитных частиц в отработанном масле. Кроме того, в [6] показано, что в магнитных коллоидах проявление эффекта Фарадея наблюдается при превышении некоторого порогового значения концентрации ферромагнитных частиц.

На рис.5. приведены результаты по динамическому рассеянию света в отработанном масле М-1045 без и при включении магнитного поля вдоль проходящего лазерного луча. Корреляционная функция и, соответственно, распределение

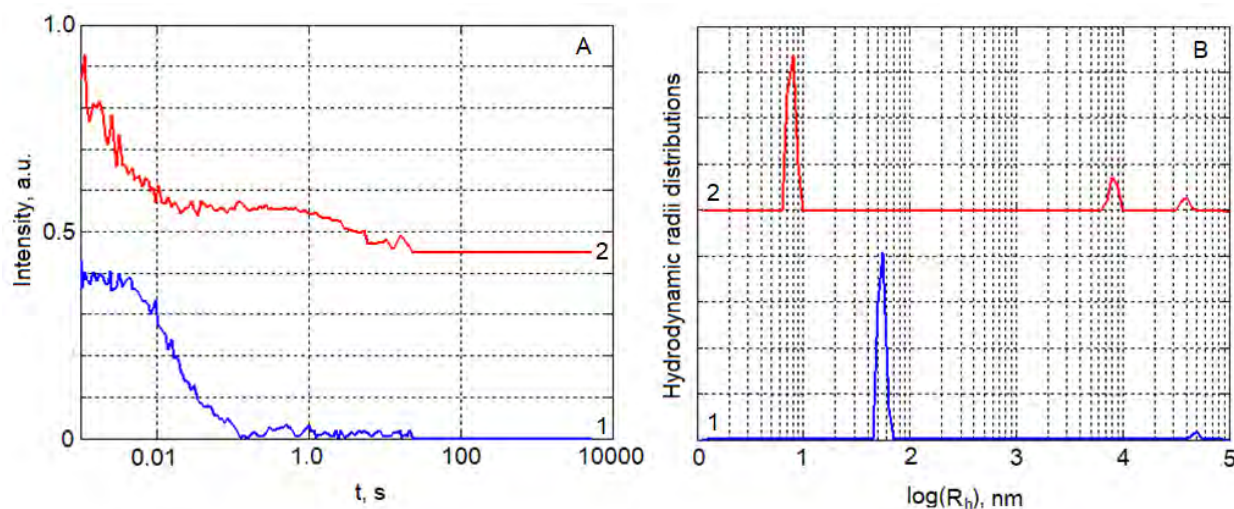


Рис. 5. Корреляционные функции (А) для рассеянного под углом $\theta = 90$ град отработанного масла в отсутствии (кривая 1) и при наличии (кривая 2) продольного магнитного поля и соответствующие распределения гидродинамических радиусов частиц (В).

гидродинамических радиусов частиц оказались очень чувствительны к магнитному полю.

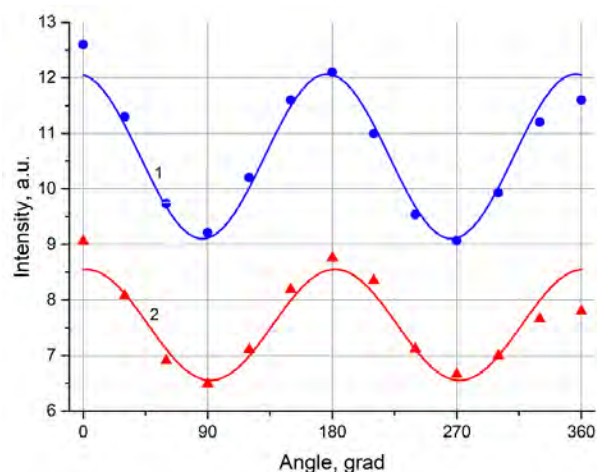


Рис. 4. Интенсивность рассеянного света под углом 90 град в отработанном масле от угла поворота анализатора: 1 – $V=0$, 2 – $V=1.6 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Если без поля преобладающий гидродинамический радиус частиц был около 55 нм, то в магнитном поле его величина становится около 8 нм. Объяснить, предположительно, полученных результат можно следующим образом. Частицы имеют не сферическую а вытянутую форму. Воздействие магнитного поля на исследованные образцы приводит к ориентации ферромагнитных частиц, деформации и объединению агрегатов в вытянутые структуры и появлению упорядоченной структурной решетки, которая исчезает при выключении магнитного поля. Появление анизотропии при включении магнитного поля приводит к изменению среднего гидродинамического радиуса ферромагнитных частиц, что и регистрируется методом динамического рассеяния света.

Заключение

В работе предложен способ обнаружения и измерения дисперсности ферромагнитных частиц продуктов износа узлов дизельного двигателя, основанный на динамическом рассеянии света отработанным моторным маслом в магнитном поле. Определен средний гидродинамический радиус частиц смыва с отработанного масляного фильтра

методом седиментации, регистрации изменения поглощения света раствором и использования решения уравнения Мейсона-Уивера. Полученные результаты позволят получать важную информацию о состоянии и неисправностях деталей и механизмов двигателя по содержанию частиц износа в отработанном масле.

Работа выполнена в рамках госзадания учредителя, рег. № АААА-А20-120103090061-5.

Литература

1. Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р. Диагностика ДВС по анализу моторного масла, изд. Уфа: ГУП РБ Уфимский полиграфкомбинат, 2011, 295 с.
2. Фитч Дж., Тройер Д. Анализ масел. Основы и применение. изд. "Профессия". 2015, 166 с.
3. Sinyavsky N.Ya. (2021). Study of ship oil products properties by NMR and optical spectroscopy, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, (in print)
4. Сажа в дизельном двигателе (2021). <https://www.oil-club.ru/sazha-v-dizelnom-dvigatеле/>
5. Mason M., Weaver W. (1924). The settling of small particles in a fluid. Phys. Rev. 23, 412–426.
6. Диканский Ю.И., Туркин С.Д. (2017). Об эффекте Фарадея в магнитных коллоидных наносистемах, Журнал технической физики, 87(12), 1895-1900

References

1. Nigmatullin R.G., Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R. Diagnostika DVS po analizu motornogo masla [Diagnostics of ICE based on the analysis of engine oil], изд. Ufa: GUP RB Ufimskiy poligrafkombinat, 2011, 295 s.
2. Fitch Dzh., Troyer D. Analiz masel. Osnovy i primeneniye [Analysis of oils. Basics and Applications]. изд. "Professiya". 2015, 166 s
3. Sinyavsky N.Ya. (2021). Study of ship oil products properties by NMR and optical spectroscopy, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, (in print)
4. Sazha v dizel'nom dvigatele [Diesel soot] (2021). <https://www.oil-club.ru/sazha-v-dizelnom-dvigatеле/>
5. Mason M., Weaver W. (1024). The settling of small particles in a fluid, Phys. Rev. 23, 412–426
6. Dikanskiy Yu.I., Turkin S.D. (2017), Ob effekte Faradeya v magnitnykh kolloidnykh nanosistemakh [On the Faraday Effect in Magnetic Colloidal Nanosystems], Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 87(12), 1895-1900

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Андрей Михайлович Иванов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: ridlerg@mail.ru

Andrei M. Ivanov, Ph.D. (Phys & Math), assistant professor of the Department of Physics, Kaliningrad state technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: ridlerg@mail.ru

Наталья Анатольевна Кострикова, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Natalya A. Kostrikova, Ph.D. (Phys & Math), assistant professor of the Department of Physics, Kaliningrad state technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Поступила в редакцию: 07.10.2021
Принята к публикации: 26.11.2021

УДК 621.436.12

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.006>

Теоретическая оценка напряженно-деформированного состояния цилиндровой втулки судового дизеля от воздействия переменных подвижных газовых нагрузок

Л.И. Ковальчук¹, e-mail: bgarf1988@inbox.ru, М.В. Бураковская¹, e-mail: bgarf1988@inbox.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Цилиндровые втулки относятся к наиболее нагруженным деталям судовых дизелей. Оценка их напряженно-деформированного состояния показывает, что последовательное форсирование дизелей по среднему эффективному давлению требует существенного пересмотра некоторых положений конструирования этих деталей. Это касается конструктивного оформления наружных поверхностей втулок, а также их закрепления в блоке цилиндров. В статье рассматривается влияние условий закрепления верхнего торца втулки и промежуточных опор-уплотнителей на деформирование цилиндровой втулки газовыми нагрузками. Показано, что для выбора оптимального места установки кольца-уплотнителя по длине втулки целесообразно исходить из минимизации воздействий на него со стороны подвижных газовых нагрузок. Предлагается расчётная методика, которая позволяет определить то место установки промежуточной опоры, где она практически не влияет на параметры напряженно-деформированного состояния цилиндровой втулки судового дизеля с учётом особенностей закрепления её верхнего торца в цилиндрическом блоке. Применение данной методики позволяет с учётом особенностей конкретного двигателя обоснованно решить вопрос размещения дополнительных опор-уплотнителей.

Ключевые слова: цилиндрическая втулка, четырёхтактный дизель, газовая нагрузка, промежуточная опора, напряженно-деформированное состояние, податливость упругой заделки, радиальные перемещения, упругое основание.

Theoretical assessment of the stress-strain state of the cylinder sleeve of a marine diesel engine from the effects of variable moving gas loads

Leonid I. Kovalchuk¹, e-mail: bgarf1988@inbox.ru, Marina V. Burakovskaya¹, e-mail: bgarf1988@inbox.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Cylinder bushings are among the most loaded parts of marine diesel engines. Evaluation of their stress-strain state shows that the sequential forcing of diesel engines according to the average effective pressure requires a significant revision of some provisions for the design of these parts. This applies to the design of the outer surfaces of the bushings, as well as their fastening in the cylinder block. The article examines the influence of the conditions for fixing the upper end of the sleeve and intermediate support-seals on the deformation of the cylinder sleeve by gas loads. It is shown that in order to select the optimal place for installing the seal ring along the length of the sleeve, it is advisable to proceed from the minimization of the effects on it from the movable gas loads. A calculation method is proposed that allows you to determine the place of installation of the intermediate support, where it practically does not affect the parameters of the stress-strain state of the cylinder liner of a marine diesel engine, taking into account the peculiarities of fixing its upper end in the cylinder block. The use of this technique allows, taking into account the characteristics of a particular engine, to reasonably solve the issue of placing additional support-seals.

Key words: cylinder liner, four-stroke diesel, gas load, intermediate bearing, stress-strain state, elastic seating flexibility, radial displacements, elastic base.

Введение

Повышение надёжности судовых дизелей является одной из актуальных проблем эксплуатации судовых энергетических установок. Вследствие комплексного характера данной проблемы решение её сопряжено с необходимостью работы в ряде направлений, таких как контроль теплонапряжённости [7] и механической напряжённости отдельных наиболее нагруженных деталей [8], повышение износостойкости пар трения [10], совершенствование систем топливоподготовки и очистки [2, 3, 4, 5, 9] и т.д. Известно, что к наиболее нагруженным деталям относятся цилиндрические втулки, при этом оценка их напряженно-деформированного состояния (НДС) показывает, что последовательное форсирование дизелей по среднему эффективному давлению требует существенного пересмотра некоторых положений конструирования этой детали. Это касается конструктивного оформления наружных поверхностей втулок, а также их закрепления в блоке

цилиндров. Нужно отметить, что при конструировании форсированных четырёхтактных дизелей полости охлаждения выполняются таким образом, чтобы исключалось охлаждение нижней части цилиндрической втулки [1, 6]. Для этого используются дополнительные опоры-уплотнители, которые выравнивают температуру самой втулки вдоль образующей и снижают напряжения в ней от воздействия тепловых нагрузок, сокращают энергопотребление в системе охлаждения и ее емкость, улучшают тепловые условия протекания рабочего процесса на режимах малых нагрузок дизеля и его экономические показатели. Однако ясно, что данное конструктивное решение будет способствовать повышению ресурса самой втулки и улучшать показатели рабочего процесса лишь тогда, когда промежуточная опора (уплотнитель) надёжно герметизирует зарубашечную полость охлаждения. Между тем применяемое для этой цели уплотнение в промежуточных опорах представляет собой, как правило, резиновые кольца, ресурс которых существенно ниже, по сравнению с другими

детальями ЦПГ и КШМ. Поэтому для выбора оптимального места установки кольца-уплотнителя по длине втулки целесообразно исходить из минимизации воздействий на него со стороны подвижных газовых нагрузок.

Таковы исходные соображения, которые говорят о том, что для решения проблемы необходимо знать закономерности изменения напряженно-деформированного состояния вдоль образующей втулки. Это позволяет в каждом конкретном случае обоснованно решить вопрос размещения дополнительных опор-уплотнителей.

1. Методы исследования

Для исследования напряженно-деформированного состояния втулки можно использовать как численные методы расчёта, так и традиционно применяемые инженерные методы. В первом приближении целесообразно использовать классические методы строительной механики, которые позволяют наглядно представить и объяснить физическую картину силового взаимодействия отдельных частей конструкции. При этом следует исходить из следующих предпосылок.

Известно [6, 11]: если круговая цилиндрическая оболочка нагружена любыми осесимметричными внешними силами, то отдельные балки-полоски, которые можно из нее выделить плоскостями, проходящими через ось оболочки, деформируются как балки, лежащие на сплошном упругом основании. Деформирование балок-полосок будет описываться известным уравнением:

$$D_u \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + k \cdot w(x) = p(x), \quad (1)$$

где D_u – цилиндрическая жесткость; k – коэффициент жесткости упругого основания; $p(x)$ – интенсивность внешней нагрузки.

Расчётная схема балки-полоски представлена на рис. 1, где L – полная длина втулки; l_1 – расстояние, на котором размещена промежуточная опора от верхнего торца втулки; $p(c)$ – интенсивность нагрузки, соответствующая фиксированному положению поршня $x=c$; A – податливость промежуточной упругой опоры; A – податливость упругой заделки.

Если жесткость основания балки k и ее сечение по всей длине неизменны, то уравнение (1) становится линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Как показано в [11], если в уравнении (1) жесткость балок-полосок положить равной цилиндрической жесткости оболочки, характеризующей ее сопротивление изгибу, а коэффициент жесткости упругого основания k равным коэффициенту жесткости колец, объединяющих балки-полоски в круговую цилиндрическую оболочку, то уравнение (1) позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние цилиндрической оболочки. При этом

$$D_u = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}; \quad (2)$$

$$k = \frac{E \cdot \delta}{r_{cp}^2}, \quad (3)$$

где δ – толщина стенки оболочки; μ – коэффициент Пуассона; r_{cp} – средний радиус оболочки; E – модуль упругости материала.

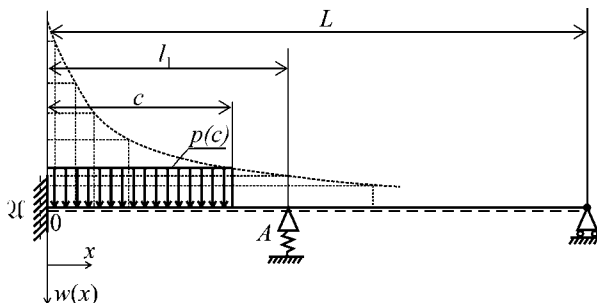


Рис. 1. Расчётная схема балки-полоски, выделенной вдоль образующей цилиндрической втулки

Для учета особенностей внешней нагрузки, действующей на оболочку на такте расширения, используем уравнение политропы

$$P(x) = P_z \cdot \left(\frac{V_z}{V_x} \right)^{n_2}, \quad (4)$$

где P_z и V_z – давление и объем в точке «z» индикаторной диаграммы; P_x и V_x – текущие давление и объем на такте расширения; n_2 – средний показатель политропы расширения.

В данном случае отношение объемов V_z/V_x целесообразно представить формулой

$$\frac{V_z}{V_x} = \frac{\rho \cdot h_{kc}}{\rho \cdot h_{kc} + s_x}, \quad (5)$$

где ρ – степень предварительного расширения;

$h_{kc} = \frac{s}{\varepsilon - 1}$ – высота камеры сгорания; ε – степень сжатия;

$s_x = \frac{s}{2} \left[1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]$ – текущее перемещение поршня; s – полное перемещение поршня; λ – постоянная кривошипно-шатунного механизма.

С учетом (5), выражение для текущего давления на такте расширения принимает вид

$$P(x) = P_z \cdot \left(\frac{\rho \cdot h_{kc}}{\rho \cdot h_{kc} + s_x} \right)^{n_2}. \quad (6)$$

Этим выражением и характеризуется переменная подвижная нагрузка, действующая на втулку на такте расширения.

Для определения частного решения уравнения (1) в качестве интенсивности нагрузки балки-полоски $p(x)$, численно равной давлению на такте расширения $P(x)$, используется ряд дискретных значений давления в надпоршневой полости $p(c)$, каждое из которых соответствует фиксированным положениям поршня $x=c$. Благодаря этому напряженно-деформированное состояние цилиндрической втулки под воздействием переменной подвижной газовой

нагрузки может быть исследовано на основании деформаций балки-полоски, выделяемой указанным выше способом, от набора ступенчато изменяющихся давлений.

Таким образом, решение уравнения (1) можно разыскивать в виде:

$$w(x) = D_0 \cdot V_0(\alpha \cdot x) + D_1 \cdot V_1(\alpha \cdot x) + D_2 \cdot V_2(\alpha \cdot x) + D_3 \cdot V_3(\alpha \cdot x) + \frac{p(c)}{k} - \left\| \frac{p(c)}{c \cdot 4 \cdot \alpha^4 \cdot D_u} \{1 - V_0[\alpha(x-c)]\} \right\| - \left\| \frac{R}{2\sqrt{2} \cdot \alpha^3 \cdot D_u} V_3[\alpha(x-l_1)] \right\|, \quad (7)$$

где D_0, D_1, D_2, D_3 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий; $V_0(\alpha \cdot x), V_1(\alpha \cdot x), V_2(\alpha \cdot x), V_3(\alpha \cdot x)$ – функции Н.П. Пузыревского; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4 \cdot D_u}}$.

Решение (7) может быть использовано для определения упругой линии и других параметров изгиба балок-полосок.

Влияние граничных условий на верхнем торце втулки на закономерности изменения радиальных перемещений вдоль образующей будем характеризовать коэффициентом податливости упругой заделки A . При этом предельным значениям этого коэффициента $A=0$ и $A=\infty$ соответствуют расчётные схемы с жесткой заделкой верхнего торца и его свободным опиранием, что рассмотрено в [6].

На верхнем торце при $x = 0$ можно записать:

$$\begin{cases} w(0) = 0, \\ w'(0) = A D_u w''(0). \end{cases} \quad (8)$$

На нижнем торце при $x = L$ получим:

$$\begin{cases} w(L) = 0, \\ w''(L) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Кроме того, для реакции опоры-уплотнителя при $x = l_1$ можно записать:

$$R = \frac{w(l_1)}{A}. \quad (10)$$

С использованием (8) – (10) можно определить все постоянные интегрирования, входящие в (7).

2. Результаты расчёта и их обсуждение

В качестве примера использования предложенной расчетной методики рассмотрим оценку напряженно-деформированного состояния цилиндрической втулки дизеля VD26/20 AL. при следующих исходных данных: $L = 550$ мм – полная длина втулки; $\delta = 15$ мм – средняя толщина стенки втулки; $l_1 = 200$ мм – расстояние, на котором размещена промежуточная опора от верхнего торца втулки; $E = 1,5 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости материала втулки; $P_z = 12,7$ МПа – максимальное давление сгорания; $r_{cp} = 107,5$ – средний радиус втулки; $\lambda = 0,27$ – постоянная кривошипно-шатунного механизма; $\rho = 1,4$ – степень

предварительного расширения; $\varepsilon = 12,5$ – степень сжатия; $n_2 = 1,25$ – средний показатель политропы расширения; $\Delta\varphi = 5^\circ$ – шаг счета по углу поворота кривошипа.

Результаты расчёта представлены на рис. 2 – рис. 4. На рис. 2 показано влияние коэффициента податливости упругой заделки на величину радиальных перемещений цилиндрической втулки под действием подвижных газовых нагрузок. Как следует из рисунка, в процессе расчёта необходимо учитывать условия закрепления верхнего торца втулки.

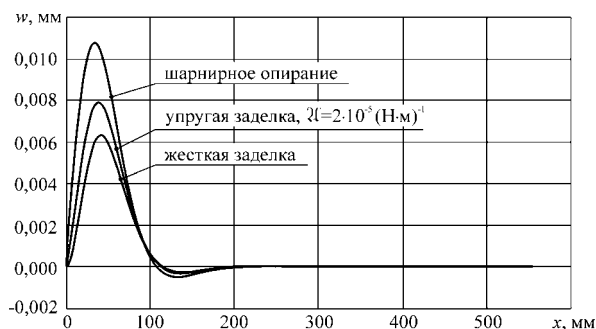


Рис. 2. Радиальные перемещения втулки при различных вариантах закрепления верхнего торца для $\varphi=45^\circ$

Результаты расчёта для различных положений поршня представлены на рис. 3, где расчёт выполнялся при наличии промежуточной опоры-уплотнителя, которая обеспечивает податливость $A = 10^{-9}$ м/Н.

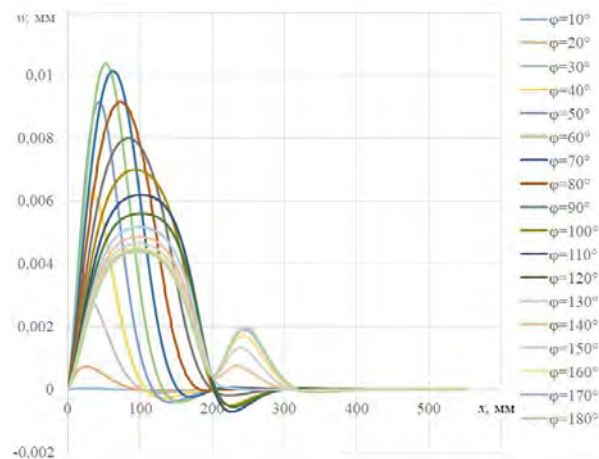


Рис. 3. Радиальные перемещения втулки для различных положений поршня при наличии промежуточной податливой опоры

Видно, что при рассмотренных жесткостных характеристиках промежуточная опора оказывает существенное влияние на деформирование цилиндрической втулки.

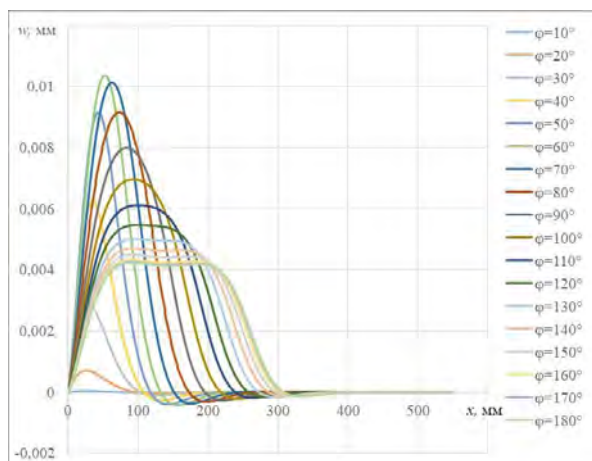


Рис. 4. Радиальные перемещения втулки для различных положений поршня при отсутствии промежуточной опоры

На рис. 4 представлены радиальные перемещения для случая $A = \infty$, что соответствует отсутствию промежуточной опоры.

При значениях $\varphi > 100^\circ$ наблюдается существенное расхождение с вариантом, в котором имеется податливая промежуточная опора (рис. 3).

Заключение

Проведенное исследование показало, что условия закрепления верхнего торца втулки оказывают существенное влияние на её деформирование подвижными газовыми нагрузками.

Предложенная расчётная методика позволяет определить то место установки промежуточной опоры, где она практически не влияет на параметры напряженно-деформированного состояния цилиндрической втулки судового дизеля с учётом особенностей закрепления её верхнего торца в цилиндрическом блоке.

Литература

1. Брук Л. Новые двигатели серии E7 компании Mack // Автомобильная промышленность США. – 1989. – № 8. – С. 17-19.
2. Воробьев Б.Н., Надежкин А.В., Кича Г.П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №3(37), т.2. – С. 112-120.
3. Кича Г.П. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. – 1985. – Т. 21, №2. – С. 28-30.
4. Кича Г.П., Воробьев Б.Н., Семенюк Л.А. Комбинирование фильтрования и центрифугирования – эффективный метод полнопоточной тонкой очистки масла в двухконтурных системах смазки судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – №4(42), т.5. – С. 59-65.
5. Кича Г.П., Семенюк Л.А., Тарасов М.И. Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объёмным фильтрованием // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – №1(47), т.2. – С. 105–112.
6. Ковальчук Л.И., Бураковский Е.П., Алексеев И.Л., Бураковский П.Е. Закономерности изменения НДС по образующей цилиндрических втулок дизелей от воздействия переменных подвижных газовых нагрузок // Автомобильная промышленность. – 2013. – №3. – С. 7-10.
7. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Расчет и контроль ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4(38), т. 2. – С. 100–104.
8. Ковальчук Л.И., Исаева М.В., Мясников Ю.Н. Формирование моделей и алгоритмов для контроля механической напряженности судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. – 2019.– №4(46), т. 4.– С. 67–72.
9. Надежкин А.В., Кича Г.П., Семенюк Л.А. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методами вариационного исчисления // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №3(37), т.2. – С. 93-100.
10. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Погодаев А.В. Повышение надежности втулок цилиндров судовых дизелей (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2018. – №3(36). – С. 76-93.
11. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля: в 4т. – Л.: Судпромгиз, 1962. Т. 1. – 576 с.

References

1. Bruk L. Novye dvigateli serii E7 kompanii Mack [New engines of the E7 series from Mack]. Avtomobil'naja promyshlennost' SShA, 1989, № 8, s. 17-19.
2. Vorob'ev B.N., Nadezhkin A.V., Kicha G.P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdelenija slozhnyh geterogennyh sistem sudovyh ustrojstv na osnove predstavlenij i apparata sluchajnyh markovskih processov [Stochastic separation modeling of complex heterogeneous systems of ship devices on the basis of the concepts and apparatus of random markov processes]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2017, №3(37), t.2, s. 112-120.
3. Kicha G.P. Ochistka masla v dvigateljah vnutrennego sgoranija [Oil cleaning in internal-combustion engines]. Himija i tehnologija topliv i masel, 1985, t. 21, №2, s. 28-30.
4. Kicha G.P., Vorob'ev B.N., Semenjuk L.A. Kombinirovanie fil'trovanija i centrifugirovanija – jeffektivnyj metod polnopotochnoj tonkoj ochistki masla v dvuhkonturnyh sistemah smazki sudovyh dizelej [The combination of filtration and centrifugation – an efficient method is full-flow fine filtration of oil in a dual circuit lubrication systems of marine diesel engines]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2018, №4(42), t.5, s. 59-65.
5. Kicha G.P., Semenjuk L.A., Tarasov M.I. Stokhasticheskaja jacheistaja model' ochistki motornogo masla ot mehanicheskikh primesej ob'jomnym fil'trovaniem [Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk]. Morskije intellektual'nye tehnologii, 2020, №1(47), t.2, s. 105–112.

6. Koval'chuk L.I., Burakovskij E.P., Alekseev I.L., Burakovskij P.E. Zakonomernosti izmenenija NDS po obrazujushhej cilindrovyh vtulok dizelej ot vozdejstviya peremennyh podviznyh gazovyh nagruzok [Regularities of changes in the stress-strain state along the generatrix of cylinder bushings of diesel engines from the influence of variable moving gas loads]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2013, №3, s. 7-10.
7. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V. Raschet i kontrol' ogranichitel'nyh po teplovoj naprjazhennosti harakteristik sudovyh dizelej [Calculation and control of limiting thermal intensity characteristics of marine diesel engines]. *Morskie intellektual'nye tehnologii*, 2017, № 4(38), t. 2, s. 100–104.
8. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V., Mjasnikov Ju.N. Formirovanie modelej i algoritmov dlja kontrolja mehanicheskoj naprjazhennosti sudovyh dizelej [Formation of models and algorithms for control of mechanical tension of marine diesel engines]. *Morskie intellektual'nye tehnologii*, 2019, №4(46), t. 4, s. 67–72.
9. Nadezhkin A.V., Kicha G.P., Semenjuk L.A. Optimizacija rezhimov kombinirovannoj ochildki motornogo masla v sudovyh dizeljah metodami variacionnogo ischislenija [The approaches of the variation solution of combined cleaning modes of motor oil in marine diesel engines]. *Morskie intellektual'nye tehnologii*, 2017, №3(37), t.2, s. 93-100.
10. Leont'ev L.B., Leont'ev A.L., Pogodaev A.V. Povyshenie nadezhnosti vtulok cilindrov sudovyh dizelej (obzor) [Improving the reliability of cylinder bushings of marine diesel engines (overview)]. *Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU*, 2018, №3(36), s. 76-93.
11. Papkovich P.F. Trudy po stroitel'noj mehanike korablja [Works on the construction mechanics of the ship]. L.: Sudpromgiz, 1962, T. 1, 576 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Игнатьевич Ковальчук, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильный транспорт и сервис автомобилей, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Марина Васильевна Бураковская, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильный транспорт и сервис автомобилей, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Leonid I. Kovalchuk, Dr. Sci. (Eng), Professor, assistant professor of the Department of automotive transport and car service, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Marina V. Burakovskaya, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of automotive transport and car service, Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Поступила в редакцию: 15.09.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 621.65

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.007>

Стенд для динамических испытаний методов вибродиагностики компрессорных лопаток

А.А. Равин¹, e.mail: ravinlki@mail.ru, О.В. Хруцкий¹, e.mail: obx47@mail.ru¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье рассматривается стендовая реализация предложенного авторами способа проведения экспериментов с рабочими лопатками аксиальных компрессоров, целью которых является отработка методов мониторинга вибраций лопаток и алгоритмов выявления характерных дефектов (усталостных трещин) непосредственно во время работы компрессора. Для обеспечения безопасности экспериментов с повреждёнными компрессорными лопатками в конструкции стенда применён один из эвристических принципов решения изобретательских задач, сформулированный Г.С. Альтшуллером, который состоит в том, что движущиеся на натурном объекте детали (лопатки) делают неподвижными, а неподвижные детали (датчики) приводят в движение таким образом, чтобы сохранить скорости их относительных перемещений. Рассмотрена конструкция стенда и состав измерительных приборов. Приведены результаты экспериментов с исправными компрессорными лопатками и с лопатками, имеющими различные стадии развития дефектов (усталостных трещин). Показано, что графическое представление ранжированных массивов измеренных временных интервалов позволяет судить о наличии дефекта и о стадии его развития.

Ключевые слова: компрессорные лопатки, вибрация, испытательный стенд, обнаружение дефектов

Stand for dynamic tests of methods vibration diagnostics of compressor blades

Alexander A. Ravin¹, e.mail: ravinlki@mail.ru, Oleg V. Khrutsky¹, e.mail: obx47@mail.ru¹St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the bench implementation of the method proposed by the authors for conducting experiments with rotor blades of axial compressors, the purpose of which is to develop methods for monitoring blade vibrations and algorithms for detecting characteristic defects (fatigue cracks) directly during compressor operation. To ensure the safety of experiments with damaged compressor blades, one of the heuristic principles for solving inventive problems, formulated by G.S. Altshuller, which consists in the fact that parts (blades) moving on a full-scale object are made stationary, and stationary parts (sensors) are set in motion in such a way as to maintain the speed of their relative movements. The design of the stand and the composition of the measuring instruments are considered. The results of experiments with serviceable compressor blades and blades with different stages of development of defects (fatigue cracks) are presented. It is shown that the graphical presentation of ranked arrays of measured time intervals allows one to judge the presence of a defect and the stage of its development.

Keywords: compressor blades, vibration, test bench, defect detection

Введение

*У нас много желаний,
и очень часто одно исключает другое.
Уинстон Черчилль*

Действительно, окружающий нас мир полон противоречий. С одной стороны, это хорошо, поскольку, если верить философам, именно наличие противоречий является движущей силой всякой эволюции и научно-технического прогресса. Но, с другой стороны, необходимость преодоления этих противоречий требует генерации принципиально новых, нестандартных технических решений. В полной мере эти рассуждения относятся к организации, так называемых, «физических экспериментов», задачей которых является как можно более близкое приближение к естественным, происходящим в натурном объекте процессам, но с использованием более простых, дешёвых, надёжных и, самое главное, безопасных физических моделей.

Именно безопасность является главным условием успешного проведения экспериментов, целью которых является практическая отработка диагностических методов и алгоритмов, а также подтверждение работоспособности приборов, предназначенных для обнаружения скрытых от обслуживающего персонала процессов деградации технического состояния роторных машин и механизмов.

В связи с ограниченностью располагаемого времени и материальных ресурсов у экспериментатора, как правило, нет возможности проведения подобных испытаний путём пассивного наблюдения за естественным (и очень медленным) процессом развития дефекта. Вместо этого в большинстве случаев проводится, так называемый, «активный эксперимент», планом которого предусматривается проведение опытов, как с исправным механизмом, так и с механизмом, в состав которого включены детали, имеющие различные стадии развития дефекта. Если при этом воспроизводятся и разрушающие воздействия, характерные для натуральных условий эксплуатации машины, всегда есть риск того, что будет превышен предельно допустимый, критический размер дефекта, в результате чего может произойти внезапное разрушение дефектной детали и авария экспериментальной установки с возможной угрозой для жизни и здоровья персонала и значительным материальным ущербом.

Одним из наиболее ответственных элементов газотурбинных двигателей являются рабочие лопатки осевых компрессоров, подвергающиеся во время работы двигателя воздействию растягивающих напряжений, вызванных центробежными силами и знакопеременными циклическими напряжениями, условленными вибрацией лопаток [1,2]. Возрастающая амплитуда этих вибраций может инициировать появление

усталостных микрповреждений структуры металла, развитие макротрещин и разрушение лопаточного аппарата компрессора (рис. 1).

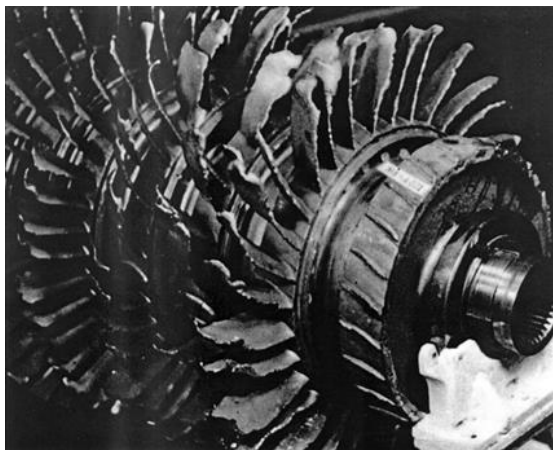


Рис. 1 Результат аварии компрессора, вызванной обрывом рабочей лопатки

Предупреждение подобных аварий требует решения двух взаимосвязанных информационных задач: организации эксплуатационного контроля интенсивности вибрации лопаток (амплитуды изгибных колебаний) и применения методов диагностики, в основе которых лежит оценка изменения колебательных свойств лопаток, вызванного развитием усталостных трещин.

наиболее эффективный способ решения этих задач заключается в установке на корпусе компрессора бесконтактных индукционных датчиков, выдающих импульсные сигналы о прохождении мимо них вершин лопаток и специальных меток, и в обработке этих сигналов с помощью специальных измерительных и диагностических алгоритмов [3–8].

Для экспериментальной отработки измерительных и диагностических алгоритмов авторами статьи предложена и испытана конструкция специальной стендовой установки, позволяющей выполнять следующие функции:

- жёсткое закрепление хвостовика лопатки;
- возбуждение изгибных колебаний пера лопатки с возможностью изменения в заданном диапазоне амплитуды и частоты;
- воспроизведение перемещений вершины лопатки и меток относительно индукционных датчиков со скоростями, соответствующими окружным скоростям вершин лопаток при вращении ротора компрессора;
- возможность безопасного испытания лопаток с трещинами.

Нетрудно видеть, что последние две функции находятся в прямом противоречии: безопасность испытаний предполагает невозможность обрыва лопатки под действием центробежной силы, но обеспечить отсутствие её действия на лопатку, расположенную на вращающемся роторе, невозможно.

Конструкция стендовой установки

В рассматриваемой конструкции стенда это противоречие предлагается разрешить за счёт применения *тринадцатого эвристического принципа Альтшуллера*: «делать движущуюся часть

объекта (лопатку) неподвижной, а неподвижную (датчики) – движущейся» [9].

Основным несущим элементом стендовой установки (рис.3) является стальная рама 1, которая крепится к фундаменту с помощью резинометаллических амортизаторов (они нужны для виброизоляции установки).

Дополнительную демпфирующую функцию выполняет массивная плита 2, на которой закреплен электромагнит 7, с помощью которого возбуждаются изгибные колебания лопатки 6, и гидравлическое зажимное устройство 5, которое требуется для обеспечения жёсткого закрепления хвостовика лопатки (рис 2).

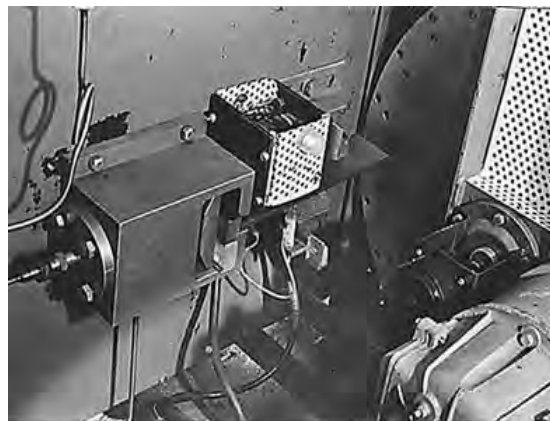


Рис. 2. Гидравлическое зажимное устройство с лопаткой и электромагнит

В натуральных условиях хвостовик лопатки жёстко зажимается в гнезде рабочего колеса центробежной силой, действующей на лопатку при вращении ротора.

Давление масла в рабочей полости зажимного устройства создаётся плунжерным насосом 3 и контролируется манометром 4.

Электромагнит имеет две обмотки: в одной из них с помощью блока управления 10 возбуждается постоянный подмагничивающий ток, а во второй – переменный ток. Создаваемое им магнитное поле возбуждает изгибные колебания лопатки. Нужно значение амплитуды колебаний обеспечивается регулировкой силы переменного тока и контролируется бесконтактным вихретоковым датчиком положения 8 с преобразователем 9.

Частота колебаний лопатки задаётся настройкой генератора звуковой частоты 11.

Бесконтактные индукционные датчики 15, которые в натуральных условиях закрепляются на корпусе компрессора, в экспериментальной установке устанавливаются на диске 12, который приводится во вращение электродвигателем 13.

Конструкция стенда позволяет настраивать величину зазора между датчиками и вершиной лопатки.

С помощью блока управления 14 можно изменять частоту вращения диска в диапазоне, соответствующем диапазону частот вращения ротора осевого компрессора. Сигналы индукционных датчиков 15 через бесконтактный

токосъёмник подаются в систему управления и обработки сигналов, состоящую из блоков формирования сигналов 17, измерительно-

вычислительного блока 18 и блока регистрации результатов 19

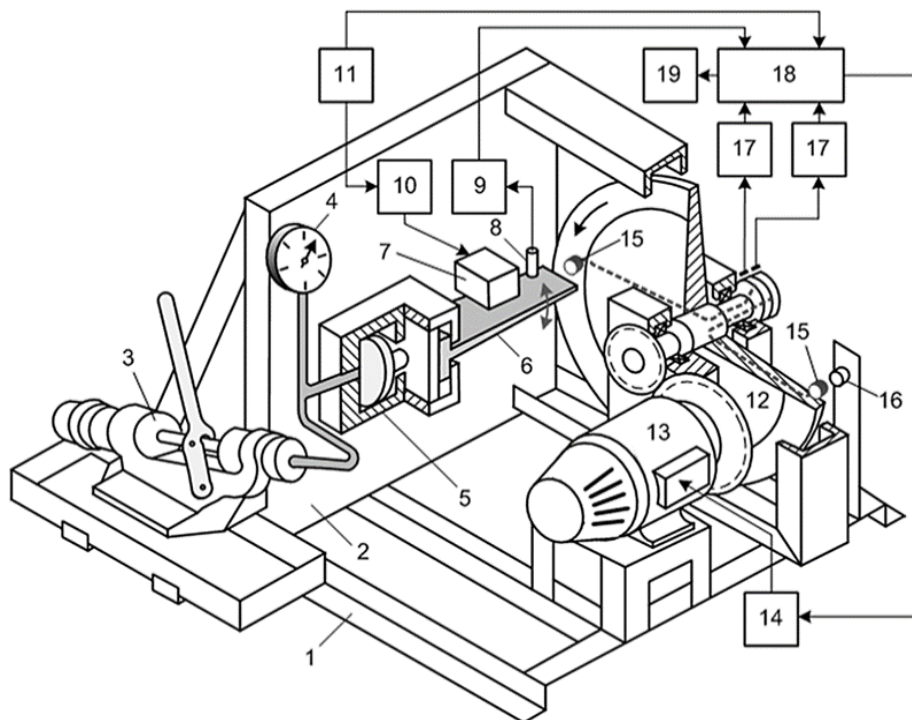


Рис.3. Конструктивная схема стенда

1 – рама; 2 – плита; 3 – плунжерный масляный насос; 4 – манометр; 5 – зажимное устройство; 6 – лопатка; 7 – электромагнит; 8 – вихревой датчик положения; 9 – преобразователь сигнала датчика; 10 – блок управления электромагнитом; 11 – генератор звуковой частоты; 12 – диск; 13 – электродвигатель; 14 – блок управления электродвигателем; 15 – индукционные датчики; 16 – стальная метка; 17 – формирователи импульсных сигналов; 18 – измерительно-вычислительный блок. 19 – блок регистрации результатов.

Результаты испытаний

Для получения информации о режиме колебаний лопатки и её техническом состоянии, в принципе, могут быть использованы различные алгоритмы обработки сигналов индукционных датчиков.

Один из них состоит в том, что сигналы датчиков 15 преобразуют в импульсную форму и многократно измеряют временные интервалы между сигналами о прохождении датчиков мимо вершины лопатки 6 и специальной метки 16,

Каждый временной интервал характеризует отклонение вершины лопатки от среднего положения в момент её прохождения мимо датчика. После накопления массива измеренных временных интервалов выполняют его ранжирование: интервалы расставляются в порядке увеличения их величины (рис.4).

В ранжированном массиве выделяют крайние значения и по их разнице судят об амплитуде колебаний вершины лопатки:

$$A = (T_{max} - T_{min}) \cdot V \cdot 10^{-3}$$

где A – амплитуда колебаний вершины лопатки, мм

T_{max} и T_{min} – крайние значения временных интервалов, мкс.;

V – окружная скорость, м/с;

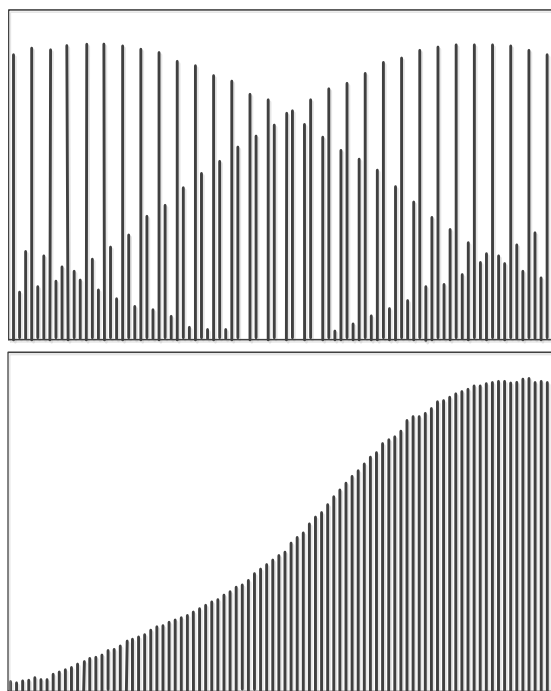


Рис. 4 Графическое представление массивов измеренных (вверху) и ранжированных (внизу) временных интервалов при испытаниях исправной лопатки

При испытаниях лопатки с трещиной, приводящей к сдвигу в область более низких частот её резонансной характеристики, происходит достаточно заметное искажение ранжированного массива (рис. 5).

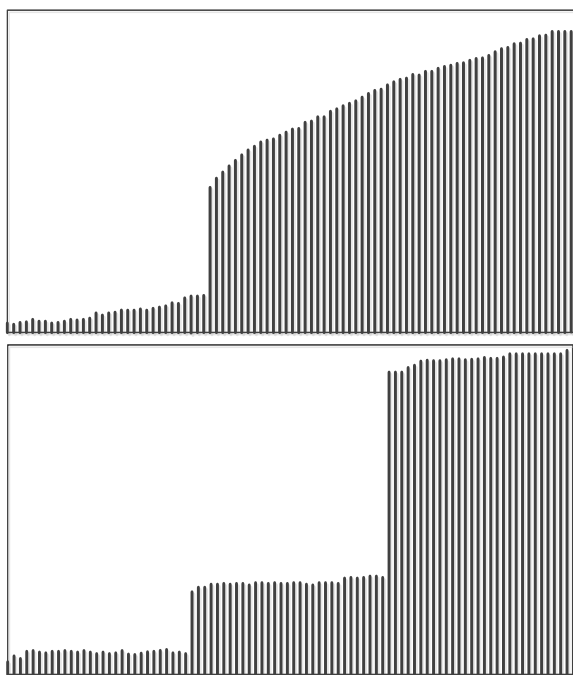


Рис. 5 Графическое представление ранжированных массивов временных интервалов при испытаниях лопатки с трещиной (вверху - сдвиг амплитудно-частотной характеристики лопатки на 0,3Гц; внизу - сдвиг АЧХ лопатки на 0,5Гц)

Более значительная величина дефекта может привести к попаданию колебаний лопатки в режим дробной кратности с частотой вращения ротора компрессора (в данной установке частотой вращения диска 12) и более значительному искажению ранжированного массива.

Приведённые на рис.5 графики свидетельствуют о том, что искажения ранжированных массивов временных интервалов могут рассматриваться, как в качестве признака появления дефекта лопатки (усталостной макротрещины), так и для оценки степени развития дефекта.

Заключение

Оригинальной конструктивной особенностью рассматриваемой стендовой установки является применение принципа «перевертыша»: хвостовик рабочей лопатки осевого компрессора, расположенный в натуральных условиях на вращающемся роторе, на стенде установлен неподвижно, а бесконтактные индукционные датчики, в натуральных условиях расположенные на корпусе компрессора, в стендовых условиях установлены на вращающемся диске. Благодаря такой компоновке стенд позволяет имитировать натурные условия вибромониторинга рабочих лопаток (и в том числе, повреждённых) без риска их внезапного разрушения под действием центробежной силы.

Применение стенда позволяет проводить испытания эффективности различных алгоритмов выделения диагностической информации, призванных повысить надёжность и безопасность эксплуатации осевых компрессоров газотурбинных двигателей [10, 11, 12].

Литература

1. Равин А.А. Диагностика судового энергетического оборудования. Deutschland, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2018, 288 с.
2. Равин А.А. Техническая диагностика судового энергетического оборудования СПб.: «Лань», 2019, 240 с.
3. А.Б. Чичков Рабочие лопатки авиационных ГТД. М., МГТУ гражданской авиации. Airspot.ru. 2018, 73 с.
4. Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю., Кулаков П.Н., Тыртышников К.Д., Кулишов С.Б., Скрицкий А.Н. Моделирование колебаний лопаток компрессоров ГТД в нестационарном потоке [Modeling of oscillations of gas-turbine engine compressor blades in unsteady flow] / Вібрації в техніці та технології, №3, 2014, с.50-56.
5. Заблочкий И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М. «Машиностр.», 1977, 159 с.
6. Петров Б.Н. Исследование и разработка цифровой измерительной системы для определения параметров вибрации рабочих лопаток турбомашин Автореферат. диссертации. Л., ЛЭТИ, 1980 г., 28 с.
7. Щёголев В.В. Повышение быстродействия статистического определения амплитуд колебаний лопаток турбомашин дискретно-фазовым методом. Известия Самарского научного центра РАН. Т. 5, № 2, 2003, с. 374-380.
8. Равин А.А., Мясников Ю.Н. Особенности применения дискретно-фазового метода вибромониторинга рабочих лопаток компрессоров морских ГТУ Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. 65(349), 2011. с. 121-130.
9. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. М.: Сов. радио, 1979, 105 с.
10. Равин А.А., Проскуряков К.Б. Анализ вибрационных характеристик рабочих лопаток осевых компрессоров // Судостроение, №2, 2012, с. 54-56.
11. Чернявский А.Ж., Данилин А.И., Прохоров С.А., Данилин С.А. Точность определения параметров колебаний лопаток турбомашин при использовании нелинейной аппроксимации сигналов первичных преобразователей / Измерительная техника, №11, 2017, с. 41-45.
12. Хруцкий О.В. Техническая диагностика: учебник. [Technical diagnostics: textbook.] СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018, 262 с.

References

1. Ravin A.A. Diagnostika sudovogo e`nergeticheskogo oborudovaniya. [Diagnostics of ship power equipment] Deutschland, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2018, 288 s.
2. Ravin A.A. Texnicheskaya diagnostika sudovogo e`nergeticheskogo oborudovaniya.. [Technical diagnostics of ship power equipment] SPb.,: «Lan`», 2019, 240 s.
3. A.B. Chichkov Rabochie lopatki aviacionny`x GTD. [Aircraft GTE rotor blades] M., MGТУ grazhdanskoj aviacii. Airspot.ru. 2018, 73 s.
4. Vorob`ev Yu.S., Ovcharova N.Yu., Kulakov P.N, Ty`rty`shnikov K.D., Kulishov S.B., Skriczkij A.N. Modelirovanie kolebanij lopatok kompressorov GTD v nestacionarnom potoke. [Modeling of oscillations of gas-turbine engine compressor blades in unsteady flow]. Vibracziï v texniczi ta texnologiyax, №3, 2014, s.50-56.
5. Zabloczkij I.E., Korostelev Yu.A., Shipov R.A. Beskontaktny`e izmereniya kolebanij lopatok turbomashin. [Non-contact measurements of vibrations of turbomachine blades]. M. «Mashinostr.», 1977, 159 s.
6. Petrov B.N. Issledovanie i razrabotka cifrovoj izmeritel`noj sistemy` dlya opredeleniya parametrov vibracii rabochix lopatok turbomashin. [Research and development of a digital measuring system for determining the vibration parameters of the rotor blades of turbomachines]. Avtoref.. diss. L., LE`TI, 1980 g., 28 s.
7. Shhyogolev V.V. Povy`shenie by`strodejstviya statisticheskogo opredeleniya amplitud kolebanij lopatok turbomashin diskretno-fazovy`m metodom. [Increasing the speed of statistical determination of the vibration amplitudes of turbomachine blades by the discrete-phase method] Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. T. 5, № 2, 2003, s. 374–380.
8. Ravin A.A., Myasnikov Yu.N. Osobennosti primeneniya diskretno-fazovogo metoda vibromonitoringa rabochix lopatok kompressorov morskix GTU. [Features of the application of the discrete-phase method of vibration monitoring of compressor rotor blades of marine gas turbines]. Trudy` CzNII im. akad. A.N. Kry`lova, vy`p. 65(349), 2011. s. 121-130.
9. Al`tshuller G.S. Tvorchestvo kak tochnaya nauka. .[Creativity as an exact science]. M.: Sov. radio, 1979, 105 s.
10. Ravin A.A., Proskuryakov K.B. Analiz vibracionny`x karakteristik rabochix lopatok osevy`x kompressorov [Analysis of vibration characteristics of rotor blades of axial compressors] //Sudostroenie, №2, 2012, s. 54–56.
11. Chernyavskij A.Zh., Danilin A.I., Proxorov S.A., Danilin S.A. Tochnost` opredeleniya parametrov kolebanij lopatok turbomashin pri ispol`zovanii nelinejnoj approksimacii signalov pervichny`x preobrazovatelej [Accuracy of determining the parameters of oscillation of turbomachine blades using nonlinear approximation of the signals of primary converters] / Izmeritelnaya tehnika, №11, 2017, s. 41– 45.
12. Khruckij O.V. Texnicheskaya diagnostika: uchebnik.SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2018, 262 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Александрович Равин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: ravinki@mail.ru

Alexander A. Ravin, Dr. Sci. (Eng), docent, Professor of the Departments of ship automation and measurements, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: ravinki@mail.ru

Олег Валентинович Хруцкий, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: obx47i@mail.ru

Oleg V. Khrutsky, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Departments of ship automation and measurements, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: obx47i@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.10.2021
Принята к публикации: 17.11.2021

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 621.3.015.38

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.008>

Влияние нелинейной нагрузки на ток однофазного замыкания в судовых электросетях

И.Е. Кажекин¹, e-mail: kazhekin@mail.ru, С.П. Финько¹, e-mail: serguey.finko@mail.ru,
М.С. Харитонов¹, e-mail: mskharitonov@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Описаны результаты исследований влияния показателей качества электроэнергии на токи однофазных замыканий в судовых электроустановках. Выявлены основные элементы бортовых электроустановок, влияющие на качество электроэнергии. Проанализировано формирование высших гармоник в токе однофазного замыкания. На физической модели электроустановки проведены исследования влияния нелинейной нагрузки на ток однофазного замыкания. Результаты экспериментов подтвердили установленные закономерности. Выявлено, что в установившемся режиме ток однофазного замыкания определяется не только величиной фазной емкости и напряжением сети, но и несинусоидальностью тока нагрузки. Экспериментально показано, что высшие гармоники, присутствующие в токе нагрузки, усиливаются в токе однофазного замыкания. При этом увеличение их амплитуд пропорционально номеру гармоники и ее амплитуде в токе нагрузки. Экспериментально установлено, что формирование высших гармоник в токе однофазного замыкания в результате эмиссии нелинейной нагрузкой приводит к увеличению его действующего значения.

Ключевые слова: судовые электросети, нелинейная нагрузка, однофазные замыкания, высшие гармоники, ток замыкания, изолированная нейтраль, безопасность электроустановок.

Nonlinear load influence on single-phase fault current in shipboard electric networks

Ilya E. Kazhekin¹, e-mail: kazhekin@mail.ru, Sergey P. Finko¹, e-mail: serguey.finko@mail.ru,
Maxim S. Kharitonov¹, e-mail: mskharitonov@mail.ru

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The paper represents the research results of the power quality indicators influence on the currents of single-phase ground faults in ship electrical installations. The main elements of on-board electrical installations that affect the quality of electricity are identified. The process of higher harmonics formation in the single-phase ground fault current is analyzed. Studies of the nonlinear load influence on the single-phase fault current are carried out on the physical model of the electrical installation. The experimental results confirmed the established patterns. For the steady-state mode it was discovered that the single-phase ground fault current is determined not only by the phase capacitance value and the mains voltage, but also by the non-sinusoidality of the load current. It has been shown experimentally that the higher harmonics of the load current are amplified in the single-phase ground fault current. In this case, the increase at their amplitudes is proportional to the harmonic number and its amplitude in the load current. It has been experimentally established that the formation of higher harmonics at a single-phase ground fault current as a result of emission by a nonlinear load leads to an increase in its effective value.

Key words: ship power networks, non-linear load, single-phase faults, higher harmonics, fault current, isolated neutral, electrical safety

Введение

В развитии судовой электроэнергетики выделяются две тенденции, способные оказать влияние на безопасное функционирование бортовых электросетей: рост числа электропотребителей и разветвленности бортовых электросетей, а также широкое внедрение силовой полупроводниковой техники.

Обе тенденции связаны с формированием тока однофазного замыкания. Первая - сопровождается увеличением совокупной длины кабельных трасс и количества электрических машин. Это приводит к росту величин фазных емкостей в бортовых электросетях, формирующих естественным образом между корпусом судна и электрооборудованием. Повышение емкостных проводимостей фазной изоляции в судовых электросетях, функционирующих в большинстве случаев с изолированной нейтралью, всегда

сопровождается ростом токов, протекающих в месте замыкания одной из фаз на корпус судна.

Вторая тенденция, связанная с увеличением количества нелинейных элементов судовых электроэнергетических систем, приводит к сильному искажению синусоидальности токов в бортовых электросистемах. Это отражается и на форме токов однофазных замыканий [1, 2].

Возникновение высших гармоник в токах однофазных замыканий обычно рассматривается с точки зрения их влияния на средства защиты. В частности, на компенсацию токов замыкания путем заземления нейтрали электросети через дугогасящий реактор [3, 4]. Искажение формы тока замыкания снижает эффективность его компенсации и ухудшает условия гашения заземляющих дуг. Кроме того, при появлении высших гармонических составляющих отмечаются проблемы в работе устройств защиты от однофазных замыканий, реагирующих на дифференциальные токи [5, 6].

Цель работы заключается в оценке влияния нелинейной нагрузки на тепловой и

электродинамический эффект от протекания тока замыкания, путем исследования изменения его действующего значения и спектрального состава. Актуальность исследований обусловлена тем, что функционирование сформировавшихся на объектах морской техники сложных электротехнических комплексов неизбежно сопряжено с увеличением интенсивности отказов [7]. При этом один из самых распространенных видов повреждений электрооборудования это однофазные замыкания. Их последствия во многом определяются действием тока, протекающего в месте замыкания. Его наименьшая опасность связана с выходом из строя электрооборудования. Однако при этом повреждения оборудования, приводящие к простоям судна во время эксплуатации, могут вызывать затраты, которые во много раз превышают стоимость поврежденных элементов электросистемы [8].

Более опасные последствия однофазных замыканий, связанные с протеканием тока, могут выражаться в следующем [9]:

- поражение людей при случайном прикосновении к токоведущим частям оборудования;
- возникновение дуговых явлений;
- выделение значительной джоулевой мощности, достаточной для воспламенения;
- воспламенение паро-, газовоздушных смесей в результате искрения между фазой и корпусом судна;
- нарушение питания электропотребителей.

Исходя из вышесказанного, изучение формирования тока однофазного замыкания с учетом высших гармоник представляется весьма важным для оценки безопасности современных судовых электросистем.

1. Источники высших гармоник в судовых электроэнергетических системах

Высшие гармоники в токе однофазного замыкания могут вызываться несинусоидальностью фазных напряжений и токов нагрузок [10]. К основным источникам высших гармоник в судовых электроэнергетических системах относятся:

- силовые трансформаторы;
- нелинейная осветительная нагрузка;
- синхронные генераторы;
- асинхронные и синхронные электродвигатели;
- полупроводниковые преобразователи.

В трансформаторах источником высших гармоник является нелинейный ток намагничивания. Наибольшее удельное значение в токах намагничивания силовых трансформаторов имеют третья, пятая и седьмая гармоники [11].

Синхронные генераторы даже в режиме холостого хода создают несинусоидальное напряжение. Искажение формы кривой напряжения зависит от геометрии активной зоны и от обмоточных данных машин. Характерными гармониками для синхронных генераторов являются гармоники от пятой до двенадцатой [11]. Однако, для большинства судовых синхронных генераторов коэффициент несинусоидальности не превышает 3%.

Возникновение гармоник в асинхронных двигателях обусловлено несимметрией полюсов, несимметрией фаз ротора и пр. При этом создаются как субгармоники, так и высшие гармоники. Их доля относительно основной гармоники незначительна [12].

Наибольший вклад в искажение токов и напряжений в бортовых электросетях вносит полупроводниковая силовая техника: выпрямители, синхро- и циклоконвертеры, осветительная нагрузка. Как отмечалось выше, масштабы её применения в современных судовых электроэнергетических системах постоянно увеличиваются. Нелинейные элементы, используемые в этих устройствах, представляют собой достаточно мощные источники высших гармоник.

Выпрямительные установки на базе неуправляемых диодов генерируют гармоники следующих порядков: 5 (около 20%), 7 (около 14%), 11 (около 9%), 13 (около 8%) [13]. Уровень гармоник, создаваемых управляемыми вентилями зависит, кроме того, еще и от углов открытия и коммутации.

2. Формирование тока однофазного замыкания в сети с нелинейной нагрузкой

Обычно формирование тока однофазного замыкания исследуется на основе упрощенной схемы замещения (рис. 1).

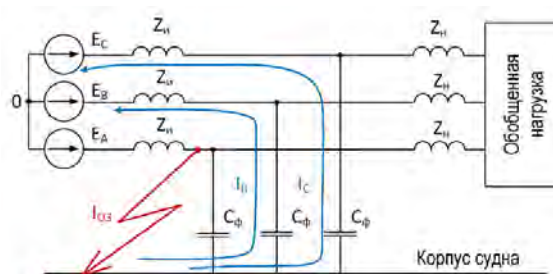


Рис. 1. Схема формирования тока однофазного замыкания в электросети с линейной нагрузкой

E_A, E_B, E_C – ЭДС обобщенного источника питания; Z_i – сопротивление источника; Z_n – сопротивление нагрузки и ее питающих кабелей; C_ϕ – емкость между фазами электросистемы и корпусом судна; I_{03} – ток однофазного замыкания; I_B, I_C – составляющие тока однофазного замыкания.

При синусоидальных токах и напряжениях нагрузка не оказывает влияния на ток однофазного замыкания, поэтому зачастую электросистема рассматривается в режиме холостого хода. В этом случае ток в месте замыкания состоит из двух составляющих, которые замыкаются через фазную емкость:

$$I_{03} = I_B + I_C = \omega C_\phi (U_{BA} + U_{CA}), \quad (1)$$

где I_B, I_C – токи утечки через емкостную проводимость изоляции; U_{BA}, U_{CA} – напряжения между неповрежденными фазами и корпусом судна.

Расчет высших гармоник тока согласно [12] проводится на основе анализа линейных схем замещения. Нелинейные нагрузки учитываются заданными токами высших гармоник. В результате схема для анализа формирования высших гармоник в токе однофазного замыкания приобретает вид, представленный на рис. 2.

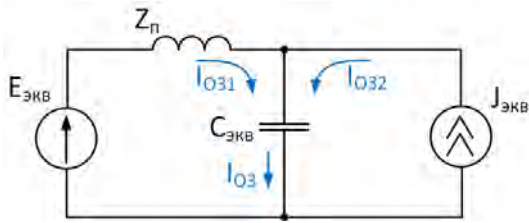


Рис. 2. Схема формирования тока однофазного замыкания

$E_{ЭКВ}$ – ЭДС эквивалентного источника питания;
 $Z_{П}$ – продольное сопротивление электросистемы;
 $J_{ЭКВ}$ – источник тока, обусловленный эмиссией высших гармоник в электросеть нелинейной нагрузкой.
 Как следует из схемы, приведенной на рис. 2, высшие гармоники, сформированные нелинейной нагрузкой, замыкаются через емкостную проводимость изоляции. Величина проводимости пропорциональна порядку гармоники. Это должно приводить не только к искажению тока замыкания, но и к увеличению его действующего значения.

Ток однофазного замыкания согласно представленной на рис. 2 схеме при $Z_{П} \ll 1/\omega C_{ЭКВ}$ будет определяться следующим образом:

$$I_{ОЗ} = I_{ОЗ1} + I_{ОЗ2} = E_{ЭКВ} \omega C_{ЭКВ} + J_{ЭКВ} \omega C_{ЭКВ} Z_{П}, \quad (2)$$

где $I_{ОЗ1}$ – составляющая тока замыкания, обусловленная питающим напряжением; $I_{ОЗ2}$ – составляющая тока замыкания, обусловленная высшими гармониками в токе нагрузки.

В выражении (2) $E_{ЭКВ}$ и $J_{ЭКВ}$ представляют собой совокупность гармонических составляющих.

3. Экспериментальные исследования высших гармоник в токе однофазного замыкания

Регистрация тока замыкания проведена на физической модели судовой электросистемы с нагрузкой, питающейся через полупроводниковый выпрямитель. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

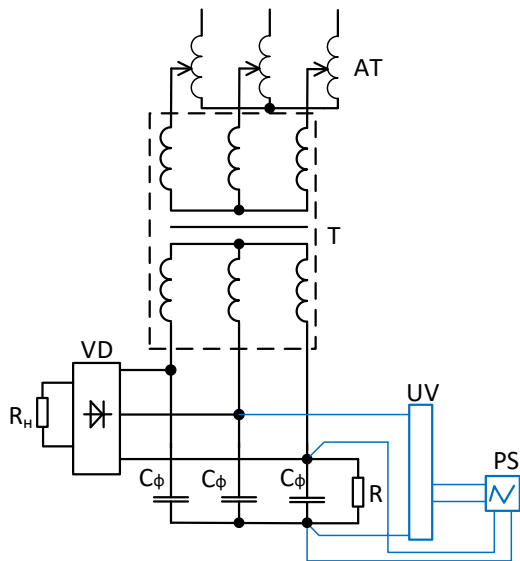


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

АТ – автотрансформатор; Т – трансформатор; VD – выпрямитель; $R_{н}$ – активная нагрузка; $C_{Ф}$ – фазная емкость электросети; R – измерительный шунт; UV – делитель напряжения; PS – осциллограф.

Нагрузка моделировалась в виде активного сопротивления, получающего питание через диодный выпрямитель VD. Выпрямитель собран по трехфазной мостовой схеме. Напряжение модели сети составляло 230 В. Замыкание осуществлялось через измерительный шунт. Осциллографом PS регистрировались ток замыкания и напряжение одной из неповрежденных фаз.

Кроме того, производилась регистрация тока нагрузки. При этом осуществлялось глухое замыкание фазы, а измерительный шунт и токовый канал осциллографа подключались к одной из фаз нагрузки.

Результаты регистрации токов замыкания при одном из моделируемых значений фазной емкости электросети (4.1 мкФ) представлены на рис. 4.

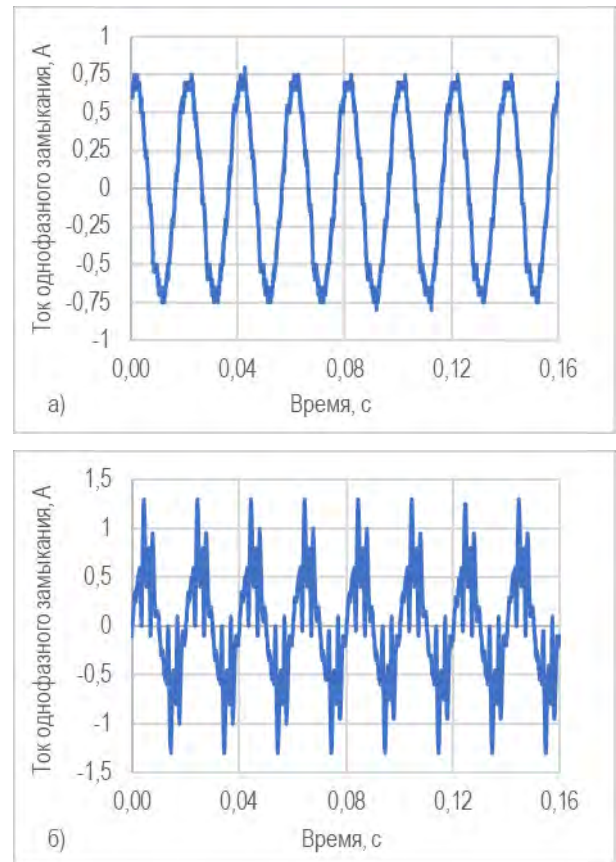


Рис. 4. Осциллограммы токов замыкания: нелинейная нагрузка отключена (а), нелинейная нагрузка составляет 0,92 А (б)

При увеличении нелинейной нагрузки от 0 до 0,92 А помимо искажения формы тока замыкания произошло изменение его действующего значения с 0,5 А до 0,54 А. Искажение синусоиды тока оценивалось по значению суммарного коэффициента гармонических составляющих (THD):

$$THD = \frac{I_H}{I_F}, \quad (3)$$

где I_F – действующее (среднеквадратичное) значение тока основной частоты за рассматриваемый промежуток времени; I_H – гармонический ток, определяющийся по формуле:

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}, \quad (4)$$

где I_n – ток n -ной гармоники.

Среднеквадратичное значение тока основной частоты I_F определяется по формуле:

$$I_F = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_i^2}{i}}, \quad (5)$$

где i – число интервалов за рассматриваемый период; I_i – значение тока на i -том интервале.

В описанных экспериментах THD тока замыкания увеличился с 8% до 46%, а максимальное мгновенное значение тока возросло более чем в 1,6 раза. Изменение действующих значений тока однофазных замыканий при различных значениях фазной емкости и суммарного коэффициента гармонических составляющих приведены на рис. 5.

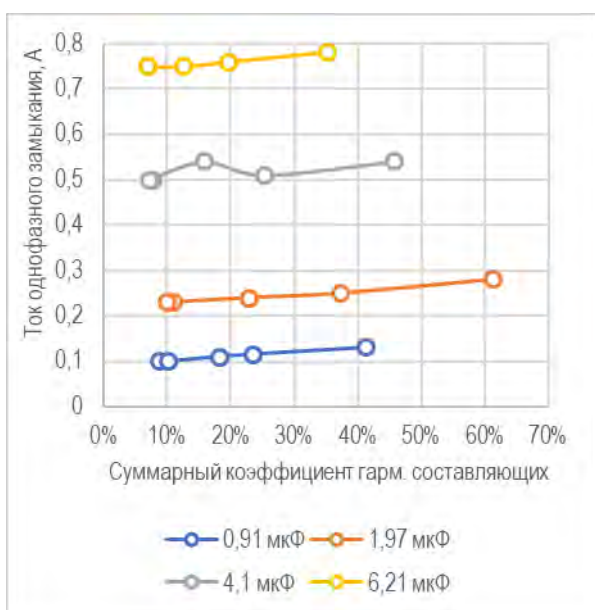


Рис. 5. Зависимости действующих значений токов однофазных замыканий от суммарного коэффициента гармонических составляющих при различных величинах фазной емкости

Как видно из рис. 5, при всех значениях фазной емкости рост коэффициента THD сопровождается увеличением действующего значения тока замыкания. Наибольшее зарегистрированное в ходе экспериментов его увеличение достигает 10%. Полученные зависимости обусловлены ростом высших гармонических составляющих из-за увеличения нелинейной нагрузки. Спектральный состав тока замыкания представлен на рис. 6.

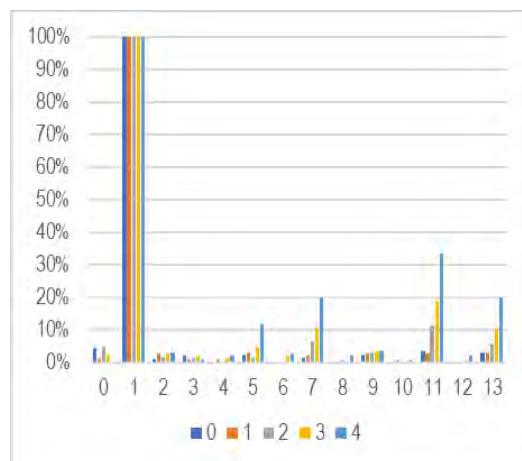


Рис. 6. Спектрограммы токов замыкания при различных режимах нагрузки

Режимы нагрузки: 0 – выпрямитель отключен; 1 – выпрямитель подключен на холостом ходу; 2 – ток нелинейной нагрузки 0,26 А; 3 – ток нелинейной нагрузки 0,47 А; 4 – ток нелинейной нагрузки 0,92 А.

Как видно из рис. 6, с ростом нелинейной нагрузки увеличиваются высшие гармоники в токе замыкания. Наибольшие амплитуды имеют гармоники следующих порядков: 5, 7, 11 и 13.

Эти гармоники практически отсутствуют в напряжении между неповрежденной фазой и корпусом судна (рис. 7). При этом постоянная составляющая этого напряжения достаточно велика.

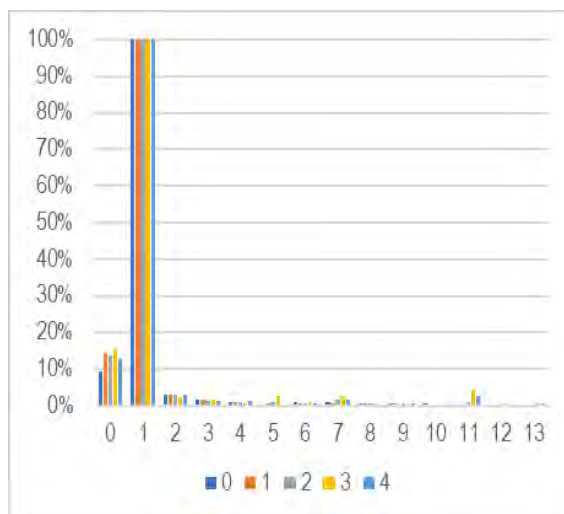


Рис. 7. Спектрограммы питающего напряжения при разных режимах нагрузки

Режимы нагрузки: 0 – выпрямитель отключен; 1 – выпрямитель подключен на холостом ходу; 2 – ток нелинейной нагрузки 0,26 А; 3 – ток нелинейной нагрузки 0,47 А; 4 – ток нелинейной нагрузки 0,92 А.

Присутствие постоянного напряжения между фазами и корпусом судна не влияет на ток замыкания, поскольку его постоянная составляющая ограничивается поперечными параметрами элементов электросистемы.

Очевидно, что спектральный состав токов замыкания определяется нагрузкой, ток которой содержит тот же набор гармонических составляющих (рис. 8). При этом если в токе нагрузки с увеличением порядка гармоники ее амплитуда уменьшается, то в токе замыкания наблюдается обратная зависимость амплитуды от номера гармоники.

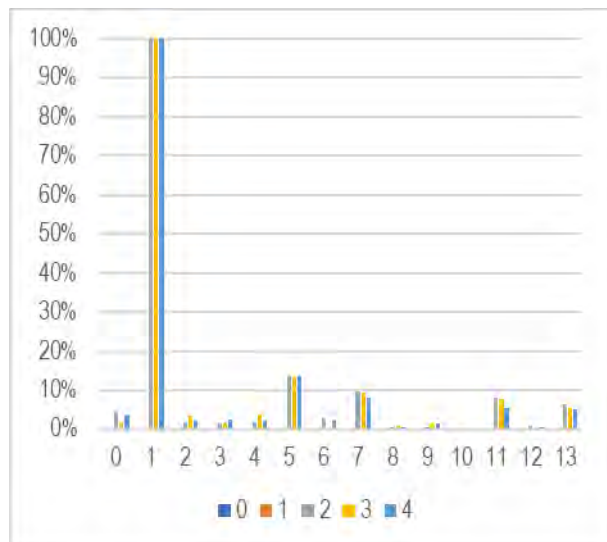


Рис. 8. Спектрограммы токов нагрузки

Режимы нагрузки: 0 – выпрямитель отключен;
1 – выпрямитель подключен на холостом ходу;
2 – ток нелинейной нагрузки 0,26 А; 3 – ток нелинейной нагрузки 0,47 А; 4 – ток нелинейной нагрузки 0,92 А.

Следует отметить, что спектральный состав тока нагрузки в проведенных экспериментах не

изменяется при увеличении его действующего значения. Однако за счет одновременного повышения амплитуд всех гармонических составляющих тока нагрузки произошло увеличение второго слагаемого в выражении (2). Это привело к тому, что с ростом нелинейной нагрузки усилилось искажение формы тока замыкания, а поскольку вторая составляющая в (2) пропорциональна частоте, произошло увеличение присутствующих в токе амплитуд гармоник с ростом их номера.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования формирования высших гармоник в токе однофазного замыкания позволили сделать следующие выводы.

При наличии нелинейной нагрузки в токах однофазного замыкания формируются высшие гармоники. Их состав и уровень во многом определяется гармоническим составом и амплитудой тока нагрузки.

Высшие гармонические составляющие, создаваемые нагрузкой, усиливаются в токе замыкания. При увеличении порядка и амплитуды гармоники в токе нагрузки наблюдается рост этой составляющей и в токе замыкания

Гармоники, возникающие из-за тока нелинейной нагрузки, приводят к увеличению действующего значения тока однофазного замыкания. Это негативно влияет на показатели безопасности, определяемые тепловым действием тока однофазного замыкания. Их оценка в современных судовых электроэнергетических системах должна проводиться с учетом повышенного тока замыкания из-за содержания в нем гармоник эмитируемых нелинейной нагрузкой.

Благодарности

Описанные в статье исследования выполнены при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (договор № 121071300023-6).

Литература

1. Авербух М.А., Прасол Д.А. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-10 кВ // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2 (14). С. 26–40.
2. Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 4. С. 14–19.
3. Steglich M., Joseph S., Rehtanz C. A Novel Method for Earth Fault Distance Calculation in Compensated Grids Using Symmetrical Components. 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). 2020. pp. 409–413, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248911.
4. Dan A.M., Czira Z., Raisz D. Decreasing the harmonic content of the fault current during single-phase to ground faults in compensated network. 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 2009. pp. 1–5, doi: 10.1109/PTC.2009.5281924.
5. Czapp S. Testing Sensitivity of A-Type Residual Current Devices to Earth Fault Currents with Harmonics, Sensors. 2020. 20, 2044; DOI:10.3390/s20072044.
6. Шуин В.А., Винокурова Т.Ю., Добрягина О.А., Шагурина Е.С. Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. № 6. С. 31–38.
7. Головки С.В. Алгоритмическое обеспечение судовых систем управления с упреждающей диагностикой отказов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2011. № 1. С. 28–31.
8. Приходько И.В. Эффективность берегового энергоснабжения судов // Журнал университета водных коммуникаций. 2011. № 4. С. 44–47.
9. Благинин В.А., Кажкин И.Е. Варианты защиты судовых электросистем от однофазных замыканий // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 3. С. 23–30.
10. Кискачи В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество. 1967. № 9. С. 24–29.

11. Шейнихович В.В., Климанов О.Н., Пайкин Ю.И., Зубарев Ю.Я. Качество электрической энергии на судах. Л.: Судостроение, 1988. 160 с.
12. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
13. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

References

1. *Averbukh M.A., Prasol D.A.* Otsenka vliyaniya vysshykh garmonik na toki odnofaznykh zamykany na zemlyu v setyakh s izolirovannoy nejtral'yu napryazheniem 6-10 kV [Assessment of the influence of higher harmonics at single-phase earth fault currents in networks of voltage 6-10 kV with isolated neutral]. *Intellektual'naya elektrotehnika*. 2021. № 2 (14). S. 26–40.
2. *Shirkovets A.I.* Issledovanie parametrov vysshykh garmonik v toke zamykaniya na zemlyu i otsenka ikh vliyaniya na gasheniye odnofaznoy dugui [Research of the higher harmonics' parameters in the earth fault current and assessment of their influence at the extinguishing of a single-phase arc]. *Relejnaya zashita i avtomatizatsiya*. 2011. № 4. S. 14-19.
3. *Steglich M., Joseph S., Rehtanz C.*, A Novel Method for Earth Fault Distance Calculation in Compensated Grids Using Symmetrical Components. 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2020. pp. 409–413, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248911.
4. *Dan A. M., Czira Z. and Raisz D.*, Decreasing the harmonic content of the fault current during single-phase to ground faults in compensated network, 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 2009. pp. 1-5, doi: 10.1109/PTC.2009.5281924.
5. Czapp, S. Testing Sensitivity of A-Type Residual Current Devices to Earth Fault Currents with Harmonics, *Sensors*, 2020,20, 2044; DOI:10.3390/s20072044.
6. *Shuin V.A., Vinokurova T.YU., Dobryaguina O.A., Shagurina E.S.* Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki urovnya nestabil'nosti vysshykh garmonik v tokeh odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh kabel'nykh setyakh 6-10 kV [Application of simulation modeling to assess the level of higher harmonics instability at the current of a single-phase earth fault in compensated cable networks of voltage 6-10 kV]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2014. № 6. S. 31–38.
7. *Golovko S.V.* Algoritmicheskoye obespecheniye sudovykh system upravleniya s uprezhdayushhey diagnostikoy otkazov [Algorithmic support of ship control systems with proactive diagnostics of failures]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. № 1. S. 28–31.
8. *Prihod'ko I.V.*. Effektivnost' beregovogo energosnabzheniya sudov [Efficiency of coastal power supply systems for ships]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy*. 2011. № 4. S. 44–47.
9. *Blaginin V. A., Kazhekin I. E.* Varianty zashity sudovykh electrosystem ot odnofaznykh zamykany. Bezopasnost' zhyznedeiyatel'nosti [Options for protection of ship power grids from single-phase faults]. 2010. № 3. S. 23-30.
10. *Kiskachi, V.M.* Selektivnost'. Signaleezatsy zamykany na zemlyu s ispol'zovaniem vysshykh garmonik [Selectivity of earth fault signaling using higher harmonics]. *Electrichestvo*, 1967. № 9. S. 24–29.
11. *Sheynikhovich V.V., Klimanov O. N., Paykin YU. I., Zubarev YU. YA.* Kachestvo elektricheskoy energuie na sudakh [The quality of electricity at ships]. L., Sudostroeniye, 1988. 160 s.
12. *Arrillaga J., Bradly D., Bodger P.* Garmoniki v elektricheskikh systemakh, M.: Energoatomizdat [Harmonics at electrical systems], 1990. 320 s.
13. *Zhezhelenko, I.V.* Vysshyye garmoniki v sistemakh jelektrosnabzheniya prompredpriyaty [Higher harmonics in industrial power supply systems]. M.: Energoatomizdat, 1984. 160 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Евгеньевич Кажекин, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Сергей Петрович Финько, аспирант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: sergey.finko@mail.ru

Максим Сергеевич Харитонов, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: mskharitonov@mail.ru

Ilya E. Kazhekin, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of electrical equipment of ships and electric power industry, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: kazhekin@mail.ru

Sergey P. Finko, Graduate student of the Department of electrical equipment of ships and electric power industry, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: sergey.finko@mail.ru

Maxim S. Kharitonov, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of electrical equipment of ships and electric power industry, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: mskharitonov@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 26.11.2021

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 658.262; 658.512:005

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.009>**Метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе учёта добавочного ресурса**О.Р. Кивчун¹, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В настоящей статье рассматривается метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе учёта добавочного ресурса. Актуальность его разработки обусловлена существующими тенденциями развития цифровой экономики во всех отраслях региональной экономики, в том числе - в припортовых комплексах региона. Важной составляющей современной цифровой экономики выступает цифровая энергетика, позволяющая регулировать управление бизнес-процессами в энергетической сфере. Обеспечение электроэнергией регионального припортового комплекса осуществляется с помощью двух подсистем регионального электроэнергетического комплекса: регионального транспортно-сетевого комплекса и регионального электротехнического комплекса. Важной задачей развития цифровой энергетики является разработка и внедрение цифровых сервисов. На сегодняшний день в региональных транспортно-сетевом и электротехническом комплексах внедрено значительное число цифровых сервисов. Однако они носят преимущественно «учётный» характер, в результате чего не способны в полной мере реализовать управление энергетическими процессами, существенно сократить затраты и повысить уровень энергоэффективности. Предлагаемый метод включает в себя модель и методики, позволяющие установить границы начала и завершения бифуркационных процессов, реализовать прогнозирование электропотребления объектов РТСК и РЭК на основе учёта добавочного ресурса и осуществить режимное нормирование электропотребления объектов, не нарушая технологического процесса. Применение данного метода может быть осуществлено в рамках динамического моделирования процесса электропотребления, исследования бифуркационных процессов, а также в качестве теоретической основы для создания сервисного программного обеспечения цифровых платформ управления электропотреблением для РТСК, РЭК и региональных припортовых комплексов.

Ключевые слова: метод, управление, электропотребление, региональный электротехнический комплекс, добавочный ресурс, векторный ранговый анализ, цифровая энергетика, цифровой сервис.

Power consumption management method objects of the regional electrotechnical complex based on the accounting of an additional resourceOleg R. Kivchun¹, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. This article discusses the method of managing the electrical consumption of a regional electrical complex based on the accounting of an additional resource. The relevance of its development is due to the existing trends in the development of the digital economy in all sectors of the region, including in regional port complexes. An important component of the digital economy is digital energy, which allows regulating the management of business processes in the energy sector. The provision of electricity to the regional port complex is carried out with the help of two subsystems of the regional electric power complex: the regional transport and network complex and the regional electrical complex. An important task of the development of digital energy is the development and implementation of digital services. To date, a fairly large number of digital services have been introduced in RTSC and REC. However, they are more "accounting" in nature and are unable to fully implement the management of energy processes in order to increase energy efficiency and reduce costs. The proposed method includes a model and methods that allow determining the boundaries of the beginning and completion of bifurcation processes, implementing forecasting of electrical consumption of RTSC and REC facilities based on accounting for additional resources and implementing regime rationing of electrical consumption of facilities without disrupting the technological process. The application of this method can be carried out within the framework of dynamic modeling of the electrical consumption process, the study of bifurcation processes, as well as a theoretical basis for creating service software for digital electrical consumption management platforms for the regional transport and network complex, regional electrical grid complex and regional port complexes.

Key words: method, management, power consumption, regional electrotechnical complex, additional resource, vector rank analysis, digital energy, digital service.

Введение

В настоящее время развитие регионов Российской Федерации предполагает переход к бурно развивающейся цифровой экономике. Как известно, цифровая экономика представляет собой хозяйственную деятельность, в рамках которой управление бизнес-процессами осуществляется на основе данных, представленных в цифровой форме.

Подобные данные являются основой для создания информационно-аналитических систем, образующих технологическую основу для социально-экономического развития регионов. Одним из ключевых компонентов цифровой экономики региона является цифровая энергетика, которая регулирует управление бизнес-процессами в энергетической сфере.

На основе анализа подсистемы регионального электроэнергетического комплекса можно заключить, что максимальное число цифровых сервисов внедряется в региональном электротехническом комплексе (РЭК) и региональном транспортно-сетевом комплексе (РТСК).

Первая подсистема – РЭК представляет собой взаимосвязанную совокупность потребителей электроэнергии, обладающую техноценологическими свойствами, имеющую цель устойчивого и качественного электропотребления. Потребители РЭК находятся на значительном удалении друг от друга, однако при этом имеют единую систему управления. Потребителями РЭК могут выступать объекты жилищно-коммунального хозяйства, объекты припортовых территорий, частные жилые дома, объекты предприятий региона и т.д. Вторая подсистема – РТСК – совокупность электроустановок, линий электропередач и объектов электрического хозяйства, обладающая техноценологическими свойствами, и имеющая цель надёжного и качественного электроснабжения потребителей РЭК.

На сегодняшний день в РТСК и РЭК внедрено достаточно большое количество цифровых сервисов. Они носят преимущественно «учётный» характер и ориентированы в основном на работу с населением региона. Цифровые сервисы обеспечивают передачу показаний приборов учёта, представляют информацию об электроустановках и электрооборудовании, позволяют дистанционно управлять приёмниками электроэнергии и частично определять их параметры. Однако в полном объёме управлять электротехническими процессами или параметрами электросети с целью повышения энергоэффективности и снижения затрат не могут. Создание прототипов таких цифровых сервисов требует разработки научно обоснованных методов, моделей и методик, позволяющих решать конкретные задачи по прогнозированию электропотребления, управлению потенциалом энергосбережения, режимному нормированию электропотребления и т.д.

Таким образом, в статье предлагается к рассмотрению впервые разработанный метод управления электропотреблением объектов РЭК на основе учёта добавочного ресурса, который представляет собой теоретическую основу для разработки цифровых сервисов для РТСК и РЭК.

1. Структура метода управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе учёта добавочного ресурса

Исходя из проведённого анализа методов исследования региональных энергосистем, можно заключить, что наиболее перспективными являются техноценологические методы. К ведущим научным сообществам в данном направлении относятся Московская, Калининградская и Новомосковская научные школы [1-7]. Труды учёных вышеуказанных школ основаны на реализации метода рангового анализа, основоположником которого является Б.И. Кудрин [1, 2, 4]. В рамках данного метода решены задачи интервального оценивания (определение объектов, аномально потребляющих электроэнергию),

краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования электропотребления техноценологическими методами, нормирования параметров и определения потенциала энергосбережения объектов.

Однако вопрос учёта внешнего управляющего воздействия при исследовании динамики процесса управления электропотреблением требует дополнительного рассмотрения.

В связи с этим, на основе векторного рангового анализа [1], выступающего одним из разделов рангового анализа, разработан метод управления электропотреблением объектов РЭК на основе учёта добавочного ресурса (далее – метод), структура которого представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структура метода управления электропотреблением объектов на основе учёта добавочного ресурса: ЭП – электропотребление

Используя научные положения данных областей науки, была разработана система основных процедур, позволяющих построить трансформированные векторные ранговые распределения (ВРР) и осуществить расчёт добавочного ресурса. К ним относятся: расчёт разности ранговых норм, мониторинг энтропии разностей ранговых норм, построение тренда энтропии разности ранговых норм, определение Z2-потенциала, МС-прогнозирование и режимное нормирование.

Применение данного метода может быть осуществлено в рамках динамического моделирования процесса электропотребления, исследования бифуркационных процессов, а также в качестве теоретической основы для создания сервисного программного обеспечения цифровых платформ управления электропотреблением для РТСК, РЭК и региональных припортовых комплексов.

Основными преимуществами метода являются: возможность осуществлять в режиме реального времени построение трансформированных ВРР, а также применять алгоритмы учёта внешнего управляющего воздействия, определения добавочных ресурсов и потенциалов энергосбережения. Кроме того, результаты метода позволяют существенно уточнить процедуры рангового анализа [1].

Таким образом, метод позволяет исследовать динамику процесса электропотреблением объектов РЭК. Теоретические основы и алгоритмическая структура метода могут стать основой для создания сервисного программного обеспечения цифровых платформ управления электропотреблением.

2. Векторная энтропийная модель управления электропотреблением

Устойчивое электропотребление РТСК, РЭК и регионального припортового комплекса имеет важное стратегическое значение для развития любого электроэнергетического комплекса Российской Федерации. Основные показатели РТСК и РЭК влияют на макроэкономические, микроэкономические показатели, социальную сферу региона, условия жизнедеятельности населения, создание благоприятного инвестиционного климата в сфере электроэнергетики, а также на повышение собственной энергоэффективности и сокращение затрат. Для обеспечения роста вышеуказанных показателей в настоящее время существует значительное число информационно-аналитических и автоматизированных систем контроля и учёта разнообразных процессов. При этом отмечается недостаточность научно обоснованных моделей и методов. В связи с этим предлагается к внедрению впервые разработанная векторная энтропийная модель (ВЭМ) управления электропотреблением объектов РЭК. На рисунке 2 представлена её структура.

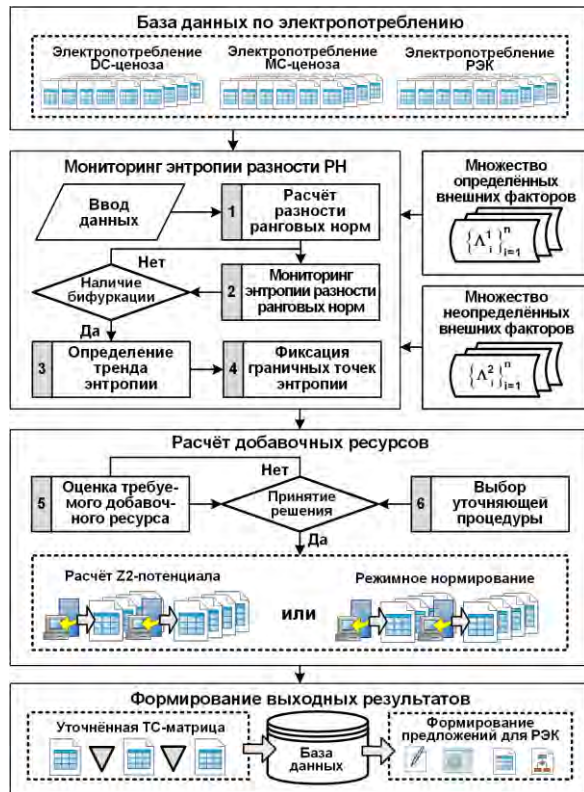


Рис. 2. Структура модели

На первом этапе реализации ВЭМ осуществляется импорт входной информации, которая представляется множеством $\Theta_V = \{q_k^V\}_{k=1}^a$. Данное множество формируется за счёт агрегации данных по электропотреблению объектов различных систем. В данном случае – это электропотребление объектов

РЭК $W_k = \{w_j^k\}_{j=1}^N$, MC-ценноза $W_{MC} = \{w_j^{MC}\}_{j=1}^n$, и

DC-ценноза $W_{DC} = \{w_j^{DC}\}_{j=1}^m$ [5].

Под MC-ценнозом следует понимать взаимосвязанную совокупность электротехнических комплексов более высокого системного уровня, обладающую системными свойствами, в состав которой входит исследуемый электротехнический комплекс как подчиненный «дочерний» объект (MC-объект). Примером MC-ценноза может служить электротехнический комплекс Российской Федерации, в котором MC-объектами являются электротехнические комплексы регионов [2].

DC-ценноз – технологически определяющая поведение зависимого электротехнического комплекса взаимосвязанная совокупность объектов, обладающая системными свойствами. При этом объекты жестко связаны с соответствующими объектами доминирующего DC-ценноза. Примером DC-ценноза выступает региональный электроэнергетический комплекс, в который входят основной региональный генерирующий комплекс, резервный генерирующий комплекс РТСК, РЭК [2].

На основе данных множеств формируется матрица исходных данных. Далее в векторном ранговом пространстве строится векторное ранговое распределение (ВРР) для значений подмножества W_k . Затем осуществляется мониторинг энтропии разности ранговых норм с целью фиксации внешнего управляющего воздействия, которое представляет собой воздействие определённых Ω_1 и неопределённых Ω_2 внешних факторов. Первопричиной возникновения факторов Ω_1 и Ω_2 является бифуркация по электропотреблению [3].

В работе [2] профессор В.И. Гнатюк вводит термин «бифуркация по электропотреблению», представляющий собой особый этап существования РЭК, на котором устойчивое развитие сменяется неустойчивым состоянием. Вместо одной инерционной траектории возникают два или несколько новых (в т.ч. бифуркационных) путей возможного устойчивого развития. Выбор между ними определяется малыми воздействиями со стороны систем управления как самого РЭК, так и внешних» [1, 2].

Многочисленные исследования бифуркационных процессов в различных предметных областях [1-3] показали, что существуют в основном две траектории изменений поведения объектов: инерционная и бифуркационная. Соответственно при рассмотрении процесса электропотребления в зависимости от траектории к множеству значений W_k прибавляется или вычитается добавочный ресурс (некоторая расчётная величина).

Мониторинг энтропии разности ранговых норм предполагает построение ВРР для инерционного варианта развития, определение норм радиус-векторов ВРР, расчёт разности ранговых норм, мониторинг энтропии разности ранговых норм, определение тренда изменения энтропии разности ранговых норм, фиксация точек начала и завершения бифуркации по электропотреблению.

Инерционное ВРР строится на основе значений множества W_k . В векторном ранговом пространстве все значения W_k имеют две координаты: электропотребление и ранговая топологическая мера.

Для каждого значения множества W_k строится радиус-вектор и определяется его ранговая норма по следующему выражению:

$$|r_j^a| = \sqrt{(W_k)^2 + (x_j)^2}, \quad (1)$$

где W_k – электропотребление объекта в ранге;

x_j – ранговая топологическая мера ранга.

На следующем этапе моделирования осуществляется мониторинг энтропии разности ранговых норм. Предположим, что в некоторый момент времени τ происходит бифуркация по электропотреблению, т.е. инерционное ВРР видоизменяется. Причинами этого могут стать изменения в кадровой политике объекта (системы), существенная модернизация или переоснащение электрооборудованием, переход на новые технологии, инфраструктурные изменения, чрезвычайные ситуации и т.д.

Математическая постановка задачи для мониторинга энтропии разности ранговых норм выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} & \{W_{rk}^{IN}(x, \tau); W_{AD}(\tau)\} \xrightarrow{H_W^{BF}(\tau)} \{W_{rk}^{BF}(x, \tau)\}; \\ & \int_0^\infty W_{rk}^{BF}(x, \tau) dx = \int_0^\infty W_{rk}^{BF}(x, \tau) dx + W_{AD}(\tau); \\ & Forec^t \{H_W\} \xrightarrow{t=\tau} H_W^{BF}(\tau); \\ & H_W(\tau) \cong - \sum_{j=1}^s \left(\frac{W_{\Delta j}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)} \cdot \ln \left(\frac{W_{\Delta j}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)} \right) \right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $W_{rk}^{IN}(x, \tau)$ – значение параметра на инерционном этапе;

τ – мгновенное значение времени;

x – ранговая топологическая мера);

$W_{rk}^{BF}(x, \tau)$ – значение параметра на бифуркационном этапе;

$W_{AD}(\tau)$ – добавочный ресурс для параметра;

$H_W^{BF}(\tau)$ – значение параметрической бифуркационной энтропии;

$Forec^t \{ \}$ – оператор прогнозирования;

$W_{\Delta}(\tau)$ – значение общего среднепараметрического электропотребления;

$W_{\Delta j}(\tau)$ – значение общего

среднепараметрического электропотребления;

s – функциональные группы.

Анализируя выражение (2) понятно, что целью мониторинга энтропии ранговых норм является расчёт параметров ВРР на бифуркационном этапе. В этом случае исследуется форма изменившегося распределения, а также его числовые значения.

Таким образом, устойчивость формы нового ВРР будет зависеть от значения энтропии ранговых норм.

В системе (2) первое и третье выражения подтверждают данное утверждение.

Второе выражение системы (2) позволяет оценить электропотребление РЭК на этапе бифуркации. Его величина будет равна сумме $W_{rk}^{IN}(x, \tau)$ и $W_{AD}(\tau)$. Основанием для вывода такого выражения являются положения закона оптимального построения техноценозов [2].

Таким образом, энтропия разности ранговых норм представляет собой сумму произведений вероятности $\frac{W_{\Delta j}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)}$ на меру $\left(-\ln \left(\frac{W_{\Delta j}(\tau)}{W_{\Delta}(\tau)} \right) \right)$. В

случае применения другой формы распределения – двухпараметрической гиперболической аппроксимационной, то математическая постановка задачи в системе (2) может быть существенно упрощена:

$$W(x) = W_1 \cdot x^{-\beta}, \quad (3)$$

где W_1, β – первая точка и ранговый коэффициент.

Параметры W_1, β являются основными при построении формы двухпараметрического гиперболического аппроксимационного ВРР.

После преобразования (1) с учетом (2) получаем [1,2]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \{W_{rk1}^{IN}, \beta^{IN}\} \xrightarrow{H_W^{BF}} \{W_{rk1}^{BF}, \beta^{BF}\}; \\ & \{W_{rk}(x)\} \rightarrow \{W_{rk1} \cdot x^{-\beta}\}; \\ & n_{BF} = const; \\ & Forec \{W_{rk1} \text{ or } \beta\} \xrightarrow{H_W} W_{rk1}^{BF} \text{ or } \beta^{BF}; \\ & W_{rk\Sigma}^{IN} + W_{AD} = \frac{W_{rk1}^{BF}}{1 - \beta^{BF}} (n_{BF}^{1 - \beta^{BF}} - 1), \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где W_{rk1}^{IN}, β^{IN} – первая точка и ранговый коэффициент ВРР на инерционном этапе;

W_{rk1}^{BF}, β^{BF} – первая точка и ранговый коэффициент ВРР на бифуркационном этапе;

n_{BF} – количество объектов на момент завершения бифуркационного этапа;

$W_{rk\Sigma}^{IN}$ – суммарное электропотребление РЭК на инерционном этапе.

Таким образом, упрощение системы (2) позволило определить основные параметры двухпараметрического гиперболического аппроксимационного ВРР, которые определяют устойчивость его формы на бифуркационном этапе. Однако, следует заметить, что при прогнозировании электропотребления используется только один параметр. Второй параметр определяется выражением (5). Затем решаются задачи определения тренда энтропии ранговых норм и фиксации границ бифуркации.

На следующем этапе модели рассчитывается функция $W_{AD}(\tau)$, которая определяет добавочный ресурс. ВЭМ предполагает расчёт двух видов добавочных ресурсов при реализации уточняющих процедур МС-прогнозирования и режимного нормирования электропотребления. Учитывая

рассчитанные добавочные ресурсы на заключительном этапе модели, формируется результирующий W_{AD} .

$$W_{AD} = W_{AD}^{Z2} + W_{AD}^{MC} + W_{AD}^R, \quad (4)$$

где W_{AD}^{Z2} – добавочный ресурс Z2-потенциала;

W_{AD}^{MC} – добавочный ресурс MC-объекта;

W_{AD}^R – добавочный ресурс R-режима.

Его величина будет определять новую форму двухпараметрического гиперболического аппроксимационного ВРР на бифуркационном этапе. В результате её анализа можно извлечь необходимую информацию для расчётов технико-экономических показателей и критериев РТСК и РЭК [2].

Для РТСК – появляется возможность рассчитать вероятный годовой и среднегодовой ущерб при эксплуатации потребителей по категориям электроснабжения, определить величину капитальных вложений при модернизации подстанций и линий электропередач, обосновать прямые и динамические затраты на эксплуатацию подстанций и линий электропередач, а также величину потерь электроэнергии.

Исследуя форму ВРР РЭК можно реализовать, используя цифровой сервис, наиболее точный прогноз электропотребления, с целью регулирования тарифов и снижения собственных затрат на электроэнергию и передать обоснованную информацию об электропотреблении диспетчеру РТСК для регулирования мощности в энергосистеме.

3. Методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса

Одной из уточняющих процедур векторной энтропийной модели является потенцирование – процедура, позволяющая определять величину потенциала энергосбережения РЭК. В настоящее время В.И. Гнатюком, А.Е. Севериным, Д.В. Луценко, С.А. Дорофеевым, А.В. Тимченко разработаны методики и алгоритмы оценки потенциала энергосбережения, которые предполагают определение Z1- и Z2-потенциалов [1, 2, 6]. Данные методики и алгоритмы апробированы и прошли успешную реализацию на объектах регионального электроэнергетического комплекса: крупных промышленных предприятиях, припортовых инфраструктурных объектах, объектах торговых сетей, жилых районах и т.д. Однако такой подход не в полной мере позволяет учесть параметры внешнего управляющего воздействия и имеет ряд сложных математических операций, затрудняющих процедуру вычисления потенциала. На рисунке 4 представлен алгоритм методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса.

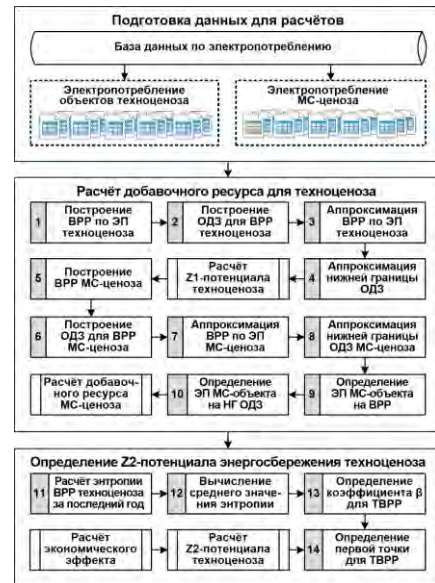


Рис. 4. Алгоритм методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса: НГ – нижняя граница; ЭП – электропотребление.

Алгоритм включает в себя три блока: подготовки данных для расчёта, расчёта добавочного ресурса для РЭК и определения Z2-потенциала энергосбережения.

Первый блок предполагает импорт данных по электропотреблению РЭК и MC-ценоза. После импорта данные проходят процедуры проверки, очистки и верификации. После чего формируется две матрицы, представляющие собой входные данные для второго блока методики.

Во втором блоке расчёт добавочного ресурса для РЭК начинается с построения ВРР распределения по электропотреблению и определения для него области допустимых значений (ОДЗ).

Далее методом наименьших квадратов осуществляется аппроксимация ВРР РЭК и его нижней границы ОДЗ. Рассчитывая разность между значениями ВРР и нижней границы ОДЗ определяется величина Z1-потенциала энергосбережения [6] (рис. 5).

Следующим шагом алгоритма является построение ВРР MC-ценоза, определение для него ОДЗ и аппроксимация полученных значений.

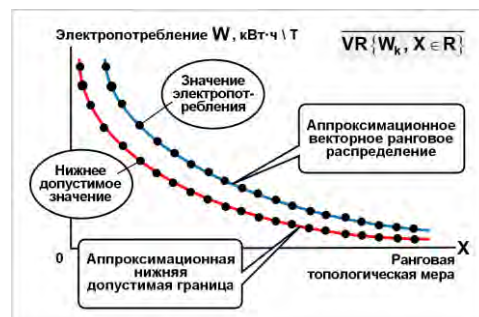


Рис. 5. Графическое представление аппроксимационных распределений

Для расчёта добавочного ресурса на основе Z2-потенциала определяется место суммарного значения электропотребления РЭК на ВРР МС-ценоза. Затем рассчитывается разность между данным значением и его нижней границей (рис. 6).

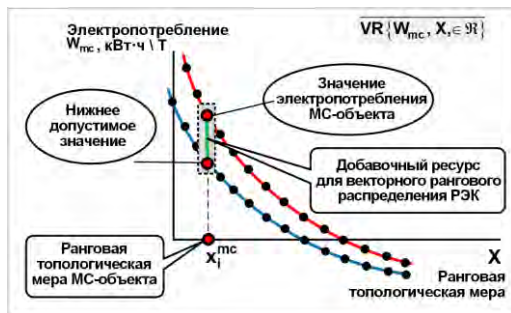


Рис. 6. Графическое представление определения добавочного ресурса

В третьем блоке на основе выражений систем (3) и (4) осуществляется расчёт энтропии ВРР РЭК за последний год, вычисляется её среднее значение и определяются параметры $W1, \beta$. Далее по полученным параметрам строится трансформированное ВРР и его ОДЗ. Затем определяется разность значений трансформированного ВРР и его нижней границы. Данная величина будет являться Z2-потенциалом энергосбережения для РЭК.

Таким образом, методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов РЭК представляет собой новый научно-методический аппарат, позволяющий учесть параметры внешнего управляющего воздействия МС-ценоза и существенно сократить ряд сложных математических операций, затрудняющих процедуру вычисления потенциала энергосбережения.

4. Методика режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса

Следующей уточняющей процедурой ВЭМ является режимное нормирование по электропотреблению. Она представляет собой процедуру, позволяющую на основе аппарата трансформированных ВРР и энтропийного подхода, нормировать электропотребление объектов РЭК в особых режимах функционирования за счёт планомерного вынужденного снижения электропотребления. Определение режимов связано с внешним управляющим воздействием [7].

При реализации режимного нормирования для объектов РЭК выделяют три режима: R3, R2 и R1. На рисунке 7 представлены определения данных режимов и их цель.



Рис. 7. Режимы ограничения электропотребления

В данной работе исследование R3, R2 и R1-режимов осуществляется на основе векторного рангового анализа. С этой целью в векторном ранговом пространстве осуществляется построение R-распределений, под которыми понимаются векторные ранговые распределения объектов РЭК по электропотреблению, характеризующие условия R-режимов.

С целью расчёта параметров R-распределений в векторном ранговом пространстве и добавочного ресурса разработана общая методика (рис. 8). В её структуру входят следующие этапы: формирование справочников категорий объектов, построение векторного рангового распределения и его аппроксимация, выбор объектов для ограничения, ограничение по электропотреблению, построение R-распределения и расчёт добавочного ресурса.

Структура базы данных по электропотреблению объектов РЭК должна содержать информацию по категориям электроснабжения. Анализ руководящих документов в области электроснабжения [1-3, 7] показал, что для РЭК существуют три категории электроснабжения: первая, вторая и третья.

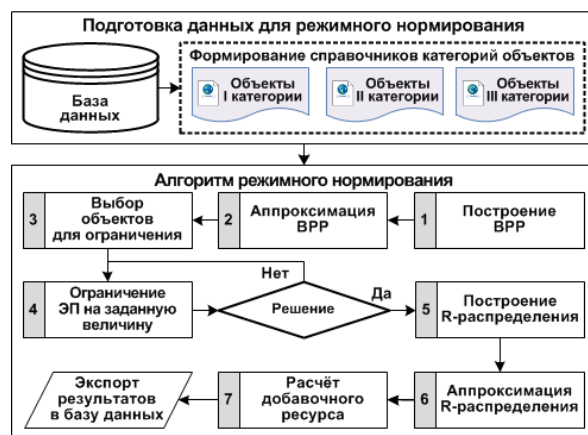


Рис. 8. Структура методики режимного нормирования электропотребления

В зависимости от категории объекта в базе данных формируются справочники категорий объектов, которые в режиме реального времени систематически обновляются. Кроме того, справочники содержат информацию о значимости и функциональности объектов. При реализации этапов методики данные справочники позволяют осуществлять выбор объектов для ограничения по электропотреблению, в зависимости от их важности на данный момент времени. Следует отметить, что процессу создания подобных справочников предшествует процедура экспертной оценки ЛПР, которую могут осуществлять ведущие специалисты или инженеры РТСК.

Для получения необходимого R-распределения ЛПР осуществляется представления отранжированных по убыванию значений электропотребления в векторном ранговом пространстве и их аппроксимация. Далее на основе информации из справочника категорий объектов производится выбор объектов для ограничения. Ограничение реализуется до необходимого уровня (например, пока не установится необходимый номинал частоты электросети). Далее с целью расчёта добавочного ресурса определяется

результатирующее расчетное электропотребление каждого объекта РЭК и формируется трансформированное BPP.

Например, для условий R3-режима можно записать:

$$\{(W_1^{R3}, x_1 = 1); (W_2^{R3}, x_2 = 2); (W_3^{R3}, x_3 = 3); \dots (5) \\ \dots (W_k^{R3}, x_k); \dots (W_{n1}^{R3}, x_{n1})\},$$

где W_k^{R3} – электропотребление объекта для R3-режима;

x_k – ранговая топологическая мера k-го ранга;

$n1$ – количество объектов, продолжающих функционировать в условиях R3-режима.

На заключительном этапе осуществляется аппроксимация R-распределения и расчёт добавочного ресурса.

Добавочный ресурс определяется как площадь полосы, заключенной между исходной не трансформированной кривой рангового параметрического распределения техноценоза и соответствующей кривой R-распределения. В частности, на рисунке 9 показан добавочный ресурс для R1-режима, который аналитически можно записать следующим образом:

$$W_{AD}^{R3} = \int_0^{\infty} W(x) dx - \int_0^{\infty} W^{R3}(x) dx, \quad (6)$$

где W_{AD}^{R3} – добавочный ресурс R3-режима;

$W(x)$ – исходное не трансформированное BPP;

$W^{R3}(x)$ – трансформированное BPP R3-режима.

Практическое применение предлагаемой методики может быть реализовано на различных объектах регионального электроэнергетического комплекса. Например, диспетчеру РТСК данная методика позволит принять решение на основе рассчитанного по выражению (6) добавочного ресурса по отключению потребителей электроэнергии РЭК, в случае изменения частоты сети, в большую или меньшую сторону.

Каждый потребитель, воспользовавшийся данной методикой, получит научно обоснованный план ресурсных ограничений приёмников электроэнергии с целью экономии собственных затрат.

Кроме того, методика может стать основой для разработки цифрового сервиса режимного нормирования электропотребления, который будет одновременно внедрён на объекты РТСК и РЭК совместно с цифровыми устройствами ограничения электропотребления.

Заключение

Проверка достоверности метода управления электропотреблением РЭК на основе учёта добавочного ресурса осуществлялась в результате длительной апробации и публикации его теоретических положений, проверки адекватности ВЭМ управления электропотреблением и оценки работоспособности методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов РЭК, а также методики режимного нормирования электропотребления объектов РЭК.

Некоторые научные положения метода были успешно применены для получения научных результатов ряда диссертаций. В работе А.В. Докучаева [2] был применён подход к прогнозированию электропотребления на основе энтропии разности рангов – четвёртое выражение системы (4). Для определения Z1-потенциала энергосбережения в работах С.А. Дорофеева и А.А. Тимченко [1, 2] был использован аппарат трансформированных ранговых распределений. Концепция процедуры режимного нормирования успешно реализуется для объектов припортового электротехнического комплекса с целью снижения собственных затрат [7].

Проверка адекватности результатов моделирования ВЭМ показала, что точность относительной ошибки моделирования составила примерно 3,2 %. Подобная точность электропотребления РЭК признана высокой. Как представляется, граничным приемлемым значением относительной ошибки моделирования является 4 – 5 %. Стандартизированные остатки моделирования лежат на прямой без существенных отклонений (выбросов) и представляют собой белый шум.

При проведении оценки работоспособности методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов РЭК системный Z2-потенциал составил около 12 % от общего электропотребления РЭК. Количество временных интервалов снижения электропотребления для достижения Z2-потенциала составило 4 года и 5 месяцев. При этом общая сумма экономии денежных средств составила 7,7 млн. рублей.

Работоспособность методики режимного нормирования электропотребления объектов РЭК проверялась в результате расчёта вероятного среднегодового ущерба из-за аварийного (вынужденного) нарушения электроснабжения для элементов сети. При реализации процедуры режимного нормирования удалось снизить количество плановых и аварийных отключений на 4 %. Соответственно, расчёт вероятного среднегодового ущерба показал, что экономия денежных средств составила порядка 5,8 млн. рублей.

Литература

1. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ: трактат [Электронный ресурс]. Калининград: Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2019. 126 с. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
2. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: монография. – 3-е изд., перераб. и доп. [Электронный ресурс]. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
3. Гнатюк В.И. Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению: трактат [Электронный ресурс]. Калининград: Техноценоз, 2020. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/knig.htm> (дата обращения: 08.06.2020).
4. Кудрин Б.И. Электроэнергетика сегодня и проблемы электрообеспечения потребителей // Промышленная энергетика. 2016. № 10. С. 5-9.

5. *Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Dorofeev S.A., Bovtrikova E.V.* Mathematical model of parametric virtualization of technocenosis data. 2nd International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems», ITIDMS-II-2021, Vol. 2922, M., 2021. pp. 90 – 99.
6. *Gnatyuk V.I., Kretinin G.V., Kivchun O.R., Lutsenko D.V.* Potential of energy saving as a tool for increasing the stability. International journal of energy economics and policy. 2018. No 8 (1). P. 137 – 143.
7. Режимное нормирование электропотребления при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун, Д.В. Луценко, Д.Г. Морозов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42), т. 3. С. 116 – 121.

References

1. Kivchun O.R. Vektorny`j rangovy`j analiz: traktat [Vector rank analysis]. Kaliningrad: Izd-vo Kaliningradskogo innovacionnogo centra «Texnocenoz», 2019. 126 s. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
2. Gnatyuk V.I. Zakon optimal'nogo postroeniya texnocenozov [The law of optimal construction of technocenoses]: monografiya. 3-e izd., pererab. i dop. [E`lektronny`j resurs]. Kaliningrad: Izd-vo KICz «Texnocenoz», 2019. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
3. Gnatyuk V.I. Cifrovoj dvojniki texnocenoza po e`lektropotrebleniyu [The digital twin of the technocenosis in terms of power consumption]: traktat [E`lektronny`j resurs]. Kaliningrad: Texnocenoz, 2020. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/knig.htm> (data obrashheniya: 08.06.2020).
4. Kudrin B.I. E`lektroe`nergetika segodnya i problemy` e`lektroobespecheniya potrebitel'ej [Electric power industry today and problems of electrical supply to consumers]. Promy`shlennaya e`nergetika. 2016. № 10. S. 5-9.
5. *Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Dorofeev S.A., Bovtrikova E.V.* Mathematical model of parametric virtualization of technocenosis data. 2 nd International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems», ITIDMS-II-2021, Vol. 2922, M., 2021. pp. 90 – 99.
6. *Gnatyuk V.I., Kretinin G.V., Kivchun O.R., Lutsenko D.V.* Potential of energy saving as a tool for increasing the stability. International journal of energy economics and policy. 2018. No 8 (1). P. 137 – 143.
7. Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Lucenko D.V., D.G. Morozov. Rezhimnoe normirovanie e`lektropotrebleniya pri e`kspluatacii ob`ektov regional'nogo e`lektrotexnicheskogo kompleksa [Regime rationing of power consumption during the operation of objects of the regional electrotechnical complex]. Morskie intellektual'ny'e texnologii. 2018. № 4 (42), t. 3. S. 116 – 121.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Романович Кивчун, кандидат технических наук, научный сотрудник Калининградский государственный технический университет, 236000, Калининград, Советский пр-т, д. 1, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Oleg R. Kivchun, Ph.D. (Eng), Researcher Kaliningrad State Technical University, 236000, Kaliningrad, Sovetsky Ave., 1, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 22.11.2021

Задачи и показатели эффективности интеллектуальной нейросетевой поддержки решений по управлению трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса

О.Г.Огий¹, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru, В.Ю.Осипов², e-mail: osipov.v@iiias.spb.su,
А.Б.Тристанов¹, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru, Н.А.Жукова², e-mail: nazhukova@mail.ru
¹Калининградский государственный технический университет, ²Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр Российской академии наук

Аннотация. Реализация стратегии развития рыбохозяйственного комплекса требует использования принципиально новой модели управления его социально-трудовой сферой, основанной на постоянном развитии: 1) человеческого потенциала, 2) производственной среды (процессов и технологий), 3) инструменты управления. Наиболее полным и эффективным решением этих задач является концепция управления трудовым потенциалом. Учитывая, что трудовой потенциал - это сложно формализуемый объект, требующий многомодельного подхода, для моделирования процессов управления им целесообразно использовать классические и новые искусственные нейронные сети. В статье представлена многоуровневая структура показателей эффективности интеллектуальной нейросетевой поддержки принятия решений по управлению трудовым потенциалом рыбохозяйственного комплекса и сформулированы одна обобщенная и шестнадцать частных задач, решение которых осуществляется методами нейросетевого моделирования и направлено. при достижении заданных значений показателей эффективности.

Ключевые слова: Трудовой потенциал, моделирование, искусственный интеллект, нейронные сети, многомодельный подход, рыбохозяйственный комплекс, управление, человеческий потенциал

Tasks and performance indicators of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex

Oksana G. Ogij¹, e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru, Vasilij Yu. Osipov² e-mail: osipov.v@iiias.spb.su,
Alexander B. Tristanov¹, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru, Natalia A. Zhukova², e-mail: nazhukova@mail.ru
¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, ²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia,

Abstract. Implementation of the strategy for the development of the fishery complex requires the use of a fundamentally new model of management of its social and labor sphere, based on continuous development of: 1) human potential, 2) work environment (processes and technology), 3) management tools. The most complete and effective solution to these tasks is the concept of labor potential management. Taking into account that labor potential is a difficult-to-formalize object that requires a multi-model approach, it is advisable to use classical and new artificial neural networks to model the processes of managing it. The article presents a multi-level structure of efficiency indicators of intelligent neural network support for decisions on managing the labor potential of the fishery complex and formulates one generalized and sixteen particular tasks, solution of which is carried out by methods of neural network modeling and aimed at achieving specified values of efficiency indicators.

Key words: Labour potential, management, efficiency, artificial intelligence, neural networks, multi-model approach, fishery complex

Introduction

Modern trends in the development of the technology of artificial neural networks and their application in applied fields [1-5] make it possible to confidently assert the prospects of this approach to approximation problems, which, in one way or another, include the problems of classification and regression, especially in the field of modeling difficult-to-formalize objects [6- 14].

Labor potential management refers to tasks with a complex, ambiguous, fuzzy object of management. By labor potential [14-19] we mean a social phenomenon that explains the ability of an actor (employee, team) to perform a labor function, sensitive to interaction with other labor potentials, changes in the work environment and manifests itself in the process of labor activity.

Speaking about labor potential management, it is required to define targets that assess the effectiveness of the management process and the effectiveness of the applied technology, both at the level of individual labor potential and at the level of communities and collectives down to the industry level. Further, management of the labor potential of the fishery complex is considered.

Within the framework of this work, an attempt was made to formulate indicators of the effectiveness of intelligent neural network support for decisions on managing the labor potential of the fishery complex, as well as to outline the range of tasks in which, according to the authors, the use of the neural network approach is appropriate.

Indicators of the effectiveness of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex

Taking into account characteristics of the process of managing the labor potential of the fishery complex with the use of artificial neural networks, let us determine indicators of this support. It should be noted that assessment of the effectiveness of such support can be carried out according to indicators of various levels. It is proposed to distinguish five such levels (Fig. 1).

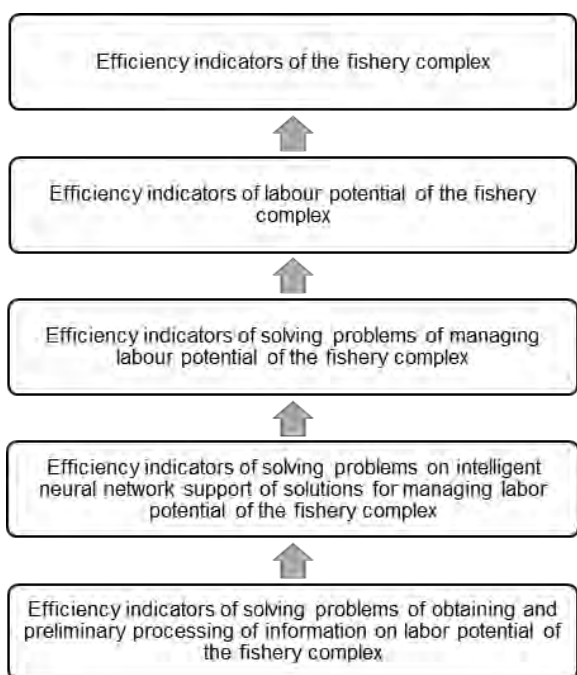


Fig. 1. Structure of efficiency indicators of intelligent neural network support for decisions on management of the fishery complex

Indicators of the lower level include indicators of the efficiency of solving problems of obtaining and preliminary processing of information on labor potential of the fishery complex. Such information includes data on individuals and work collectives, their number, qualifications, age, living and working conditions, processes associated with them, and others. Among such indicators, we should note the volume, completeness, reliability, efficiency of obtaining the necessary information.

At the second level, there are own indicators of the efficiency of solving individual tasks for intellectual neural network support for labor potential management. These are indicators of solving problems related to neural network forecasting of staff turnover and training results, employee health, changes in work environment, advanced training, emergence of new specialties, jobs, employee satisfaction with work environment, possible conflicts and other events. Examples of such indicators are absolute relative and root mean square errors, time and computational resources. The success of solving problems of neural network recognition of faces, situations and events related to labor potential, financial, economic, psychological, informational and other threats to fishery and aquaculture workers can be assessed by the probabilities, time and complexity of classifying the recognized objects and processes as true ones.

Solution of tasks of neural network speech processing, converting oral speech into text and vice versa, translating speech from one language to another is also assessed by probabilistic characteristics, as well as absolute errors and resource consumption. Indicators of the success of the formation of neural network models of perceived events include adequacy, the amount of memory occupied, the time of formation of models, and others. Solution of tasks on the neural network development of proposals for the direct management of labor potential at the level of the tasks themselves is feasible in terms of accuracy and time costs.

At the third level, effectiveness of intelligent neural network support can be assessed by integral indicators of the accuracy of solving a set of lower-level tasks, taking into account their importance, as well as by the integral cost of resources. Composition of these indicators also includes own indicators of cognitive machines - assistants, the persons themselves who make managerial decisions on the personnel policy of the fishery complex, persons and funds that implement these decisions.

Indicators of the fourth level characterize intelligent neural network support for management decisions on the growth of indicators of labor potential itself due to this support.

At the fifth level, efficiency of the analyzed intellectual neural network support can be assessed by contributions to the development indicators (target indicators) of the fishery complex as a whole.

Generalized formulation of the task of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex

According to the proposed generalized formulation, it is necessary to find an expedient way S_o of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex and the cognitive assistant machine $M(S_o)$ that implements it, at which the extremum of the main performance indicator is ensured,

$$W_o(S_o, M_o(S_o)) = \text{extr}_{S_i \in E} W_i(S_i, M_i(S_i)), \quad (1)$$

and the conditions are met - restrictions on auxiliary indicators, $Z_j(S_i, M_i(S_i))$,

$$Z_j(S_i, M_i(S_i)) \in \Omega_j; \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}. \quad (2)$$

Depending on the options for the main and auxiliary performance indicators in (1), (2), many different specific statements of this problem are admissible. For example, the main indicator can be one of the indicators of a cognitive assistant machine

$$W_i(S_i, M_i(S_i)) = \sum_{n=1}^N A_n P_{ni}(S_i, M_i(S_i)), \quad (3)$$

reflecting the total contribution of all tasks of intellectual neural network support to labor potential management, where

A_n - relative weight of n - task;

$P_{ni}(S_i, M_i(S_i))$ - probability of successful solution of n -task with i -M method.

It can also be an indicator of the labor potential itself. In some cases, one of the indicators of the efficiency of the fishery complex is applicable, for example, quantitative increase in production due to the applied neural network support for management decisions.

The conditions for solving a problem using (3) can be constraints on the types and number of intellectual tasks to be solved by a cognitive assistant machine, the architectures of artificial neural networks used, their parameters, information processing time, total amounts of memory occupied, and others.

The bigger the number of possible alternative ways of the required neural network support is the higher is the

problem complexity. The complexity of this task can be significantly reduced if the search for an expedient solution is carried out under strict constraints on auxiliary performance indicators. Taking into account the indicators of higher levels, it is required to additionally build and analyze models of these levels.

In general, solution of the problem under consideration provides for generation (synthesis) of alternative methods of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex, satisfying the conditions - restrictions, assessing the main indicator, and choosing the method with the highest value of this indicator.

Statement of tasks of neural network forecasting of events related to management of labor potential of the fishery complex

It is to be recalled that the neural network forecasting under consideration can be carried out in the interests of predicting a wide range of social and economic events. Forecasting can be performed using artificial neural networks with different architectures and parameters. Forecasting is feasible using both feed-forward networks and recurrent structures.

Examples of formulations of such forecasting tasks are the following.

Task 1. If it is necessary to build a neural network forecasting system with limited parameters of the used neural network, which ensures timely receipt of forecasts with the highest accuracy, the following task can be solved. It is required to find an expedient method S_o . It is required to find an expedient method of neural network forecasting of events, at which a minimum of mean-square errors $W_o(S_o)$ is achieved in the resulting forecasts for the horizon Δt ,

$$W_o(S_o) = \min_{S_i \in E} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (x_t - \hat{x}_t(S_i))^2} \quad (4)$$

and the conditions are met:

$$t_i(S_i) \leq T; \quad (5)$$

$$r_i(S_i) \leq R; \quad (6)$$

$$l_i(S_i) \leq G. \quad (7)$$

$$i = \overline{1, I}.$$

In task (4) - (7), the following notations are agreed: m – number of time points in the forecast; x_t - true event values at t - moment; $\hat{x}_t(S_i)$ - predicted event values.

According to (5) forecast time $t_i(S_i)$ with S_i method must not exceed the permissible T . In accordance with (6), the number of neurons $r_i(S_i)$ in the used artificial neural network should not exceed R . According to condition (7), the number of layers $l_i(S_i)$ in the neural network should not exceed G .

Task 2. This task is applicable when it is required to build a neural network forecasting system with obtaining the fastest solutions. According to it, it is necessary to find a method S_o of neural network forecasting of events, at which, for a given forecast horizon, the

minimum of the forecast generation time $t_o(S_o)$ is reached

$$t_o(S_o) = \min_{S_i \in E} t_i(S_i), \quad (8)$$

and conditions (6), (7), (9) are met,

$$\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (x_t - \hat{x}_t(S_i))^2} \leq B. \quad (9)$$

Task 3. It is focused on cases of significantly limited computational capabilities for the implementation of a neural network forecasting system.

It is envisaged to search for a method S_o of neural network forecasting of events, related to management of labor potential, in which an artificial neural network with $r_o(S_o)$ - a minimum number of neurons is used

$$r_o(S_o) = \min_{S_i \in E} r_i(S_i), \quad (10)$$

however conditions (5), (7) and (9) are met.

Task 4. A method S_o is being found for neural network forecasting of events with continuous training of a neural network, at which a minimum of relative errors in predictions is achieved

$$W_o(S_o) = \min_{S_i \in E} \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \left| \frac{x_t - \hat{x}_t(S_i)}{x_t} \right|, \quad (11)$$

and conditions (5) – (7) are met. According to this task, only those methods are analyzed that ensure the continuity of the training of the network when it makes predictions.

Task 5. Sometimes there may be a need to obtain forecasts for large horizons. In this case, it is envisaged to search for a method S_o of neural network forecasting of events, at which the maximum of the forecasting horizon $\Delta t_o(S_o)$ is achieved,

$$\Delta t_o(S_o) = \max_{S_i \in E} \Delta t_i(S_i) \quad (12)$$

in case conditions (5) – (7), (9) are met.

Other tasks of neural network forecasting of events may take into account restrictions on activation functions implemented by neurons, recurrence of neural networks, on the rules for transforming the initial time series to the input "language" of the network, amount of memory occupied, and others.

To ensure high accuracy of the obtained neural network forecasts, it is necessary to pay special attention to the input data used. Note that the laws of change in some time series can significantly depend on the behavior of other series, which are not explicitly related to each other.

The type and characteristics of the initial data may impose their own requirements on the parameters of the artificial neural networks used. Not only must the processed time series be transformed to the required form, they must also be consistent with the inputs of the neural network.

Statement of tasks of neural network reset of missed events

In the practice of managing labor potential of the

fishery complex, situations also arise when it is necessary to obtain information about past missed events. Events can be skipped for various reasons. This can be a malfunction of monitoring tools and systems, the presence of unintentional and intentional interference, erroneous deletion of previously saved data, and others.

A specific example of the need to restore missed events is lengthening of time series samples obtained under noise conditions. It is known that it is impossible to obtain accurate forecasts for large horizons based on short samples of time series; long samples are needed. Without knowing the past events, it is difficult to justify management decisions.

When developing neural network systems focused on reset of missed events, the following tasks can be solved.

Task 6. It is required to find a method S_o for neural network recovery of events, in which $L_o(S_o)$ maximum length of the reproduced sample of the time series is achieved

$$L_o(S_o) = \max_{S_i \in E} L_i(S_i) \quad (13)$$

for a given time, with the number of errors, not more than the permissible value.

Task 7. It is required to develop a method S_o neural network recovery of a time sample at a given elapsed time interval, providing $Q_o(S_o)$ - maximum accuracy of this reset

$$Q_o(S_o) = \max_{S_i \in E} Q_i(S_i) \quad (14)$$

using a recurrent neural network with parameters no more than admissible.

Task 8. This task involves the search for a method S_o for neural network restoration of distorted video frames with an accuracy not lower than the required

$$Q_i(S_i) \geq Q_z \quad (15)$$

in the shortest possible time $t_o(S_o) = \min_{S_i \in E} t_i(S_i)$

using a recurrent artificial neural network with a given architecture.

Other formulations of similar tasks of neural network recovery of events are also possible, differing in the sets of conditions for the search for expedient methods.

Statement of tasks of neural network event recognition in relation to management of labor potential of the fishery complex

Using artificial neural networks, it is feasible to recognize faces, situations, processes related to labor potential, financial, economic, psychological, information threats for employees of fishery enterprises.

Potentially, practically all known architectures of artificial neural networks are applicable to solving recognition tasks. However, the so-called convolutional neural networks have shown the greatest advantages in recognition of static and dynamic patterns. Even within the framework of applicability of only convolutional neural networks for solving pattern recognition tasks characteristic of the labor potential management of the fishing industry, various implementation methods are

possible, differing from each other, both in goals and in conditions for achieving them.

When setting the tasks of such recognition, it is necessary to take into account the priority goals associated with ensuring its accuracy, efficiency, saving resources and other indicators. Taking this into account, it is possible to formulate a number of new tasks to find expedient ways of recognizing static and dynamic images in relation to the labor potential management of the fishery complex.

Task 9. This task is associated with recruitment. According to it, it is necessary to find an expedient method of neural network recognition of candidates most suitable for vacant positions, with restrictions on the recognition time and computing resources of the system that implements it. The initial data for solving this problem can be photos of candidates, written and oral information about them.

Task 10. This task can arise when recognizing complex events characterized by many different factors. In particular, it may suggest the following search. This is finding an expedient method of neural network recognition of events in the field by simultaneous analysis of video, sound and chemical information, which ensures maximum recognition accuracy at a given time interval with limited computing resources. Peculiarities of this task should also include: the need to bring heterogeneous signals to one "language" perceived by the network; selection of neural network architecture and overcoming high computational complexity.

Task 11. While ensuring comfortable work environment for fish processing employees at a number of facilities, it is necessary to monitor the smells in the premises and ventilate them in a timely manner or eliminate negative sources. Focusing on these conditions, it is advisable to develop a method S_o for neural network recognition of possible smells at processing plants with a given accuracy, for a fixed time with $C_o(S_o) = \max_{S_i \in E} C_i(S_i)$ - minimal consumption of

computing resources for its implementation. The initial data can be the results of spectral analysis.

Task 12. In the interests of timely identification of latent financial and economic threats in the activities of the fishery complex, we will search for expedient methods of their neural network recognition by indirect signs in an effort to minimize possible errors.

Statement of tasks of neural network synthesis of management decisions

It is desirable that intelligent neural network systems are able to analyze the information entering them and form conscious influences on it. Among the formulations of creative tasks of this kind, for the creation of cognitive machines - assistants to decision-makers in managing labor potential of the fishery complex, the following can be distinguished:

Task 13. The search for expedient methods of neural network formation of conscious responses (actions) to questions posed in natural language to a cognitive assistant machine, with restrictions on the resources used and accuracy. As such questions can act as questions of assistance to decision-makers in conditions of high uncertainty of situations. Among them there may be requests for recommendations and possible risks from decisions made, others.

Task 14. Sometimes, when it is not possible to transmit video information through communication channels, it may be necessary to search for an expedient method of prompt neural network formation of verbal descriptions of the observed objects (processes) with a given accuracy.

Task 15. Using artificial neural networks, it is also possible to solve the problem of forming images of interest. This task can provide for the search for an expedient method of neural network image formation based on perceived verbal descriptions in a minimum time with a given accuracy and computational resources.

Task 16. In many economic and social situations in the context of extraction of aquatic biological resources (in the field), characterized by high uncertainty of events, it is required to make various management decisions. Their search using traditional methods is significantly difficult and extremely expensive because of the difficulties with formalization. However, it is possible to successfully synthesize expedient methods of neural network control of various objects of the fishery complex with continuous training of the system, ensuring achievement of specific goals in given conditions. The neural network management of labor potential of the fishery complex can also be explicitly used to form recommendations, both for individual employees and the ship's crew (shipboard personnel of the organization) on correcting their behavior, avoiding getting into critical situations, preparing for upcoming implicit events, etc.

Undoubtedly, search for such methods should provide for the development of the principles of neural network processing of heterogeneous information, architectures of artificial neural networks themselves and methods for processing signals in them.

Conclusion

In order to design an intelligent system for managing labor potential of the fishery complex, a system of indicators of intelligent neural network support was proposed, and a number of new promising tasks for its implementation were formulated.

In the near future, we should expect further development of weak neural network artificial intelligence based on the complex use of private neural network solutions in combination with traditional methods of information processing.

With regard to neural network intellectual support for decisions on managing labor potential of the fishery complex, in terms of its development, it is necessary to form a system of indicators and formulate promising problems of such support, taking into account the objective laws of the analyzed processes.

In the future, these tasks can be solved and promising cognitive machines can be created - assistants with ample opportunities to solve creative problems associated with supporting decisions on managing labor potential of the fishery complex.

References

1. Masum A.-K. et al. Intelligent Human Resource Information System (i-HRIS): A Holistic Decision Support Framework for HR Excellence // The International Arab Journal of Information Technology. 2018. Vol. 15, № 1. P. 121–130.
2. Seelen W. v., Behren K. Principles of Neural Information Processing. Springer, 2016.
3. Haykin S. Neural networks and learning machines. Third Ed. New-York: Prentice Hall, 208AD.
4. Marwala T., Hurwitz E. Advanced Information and Knowledge Processing Artificial Intelligence and Economic Theory: Skynet in the Market.
5. Gogas P., Papadimitriou T. Machine Learning in Economics and Finance // Computational Economics. Springer, 2021. Vol. 57, № 1.
6. Turner J.H. Theoretical Sociology. SAGE Publications, 2014.
7. Melnik R. Mathematical and computational modeling : with applications in natural and social sciences, engineering, and the arts.
8. Lave C.A., March J.G. An introduction to models in the social sciences. Lanham: University Press of America, 1993.
9. Swedberg R. Theorizing in sociological research: A new perspective, a new departure? // Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2017. Vol. 43. P. 189–206.
10. Edling C.R. Mathematics in Sociology // Annual Review of Sociology. 2002. Vol. 28, № 1. P. 197–220.
11. Swedberg R. Theorizing in sociological research: A new perspective, a new departure? // Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2017. Vol. 43. P. 189–206.
12. Page S. Model thinking. How to analyze complex phenomena using mathematical models M.: Mann, Ivanov and Ferber, 2020.
13. Page S.E. What Sociologists Should Know About Complexity // Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2015. Vol. 41, № 1. P. 21–41.
14. Miller J.H., Page S.E. Complex adaptive systems : an introduction to computational models of social life. Princeton University Press, 2007. 263 p.
15. Romashevskaya N.M., Migranova L.A., Toksandaeva M.S. Human and labor potential of Russian regions // Population. 2014. Vol. 3, No. 65. P. 106-119.
16. Patutina E.S. Main approaches to interpretation of the concepts of "labor potential" and "human potential" as the basis for the quality of the labor force in the works of domestic and foreign scientists // SCIENCE. RESEARCH. PRACTICE. Collection of selected articles based on the materials of the International Scientific Conference. 2020. P. 215–220.
17. Ogij O.G., Tristanov A.B. Methodological base for the study of the labor potential of the region // Materials of the VII International Baltic Maritime Forum. In 6 volumes. Kaliningrad: BFFSA FSEI HE "KSTU," 2019. P. 722–726.
18. Shkurkin A.M. Labor potential of the territory: textbook. M.: Litagent Flinta, 2012.
19. Human resources management: concepts, methodologies, tools, and applications. Pennsylvania: IGI Global, 2012. 1513 p.

References

1. Masum A.-K. et al. Intelligent Human Resource Information System (i-HRIS): A Holistic Decision Support Framework for HR Excellence // The International Arab Journal of Information Technology. 2018. Vol. 15, № 1. P. 121–130.
2. Seelen W. v., Behren K. Principles of Neural Information Processing. Springer, 2016.
3. Haykin S. Neural networks and learning machines. Third Ed. New-York: Prentice Hall, 208AD.
4. Marwala T., Hurwitz E. Advanced Information and Knowledge Processing Artificial Intelligence and Economic Theory: Skynet in the Market.
5. Gogas P., Papadimitriou T. Machine Learning in Economics and Finance // Computational Economics. Springer, 2021. Vol. 57, № 1.
6. Turner J.H. Theoretical Sociology. SAGE Publications, 2014.
7. Melnik R. Mathematical and computational modeling : with applications in natural and social sciences, engineering, and the arts.
8. Lave C.A., March J.G. An introduction to models in the social sciences. Lanham: University Press of America, 1993.
9. Swedberg R. Theorizing in sociological research: A new perspective, a new departure? // Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2017. Vol. 43. P. 189–206.
10. Edling C.R. Mathematics in Sociology // Annual Review of Sociology. 2002. Vol. 28, № 1. P. 197–220.
11. Swedberg R. Theorizing in sociological research: A new perspective, a new departure? // Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2017. Vol. 43. P. 189–206.
12. Peydzh S. Model'noe myshlenie. Kak analizirovat' slozhnye yavleniya s pomoshch'yu matematicheskikh modeley.[Model thinking. How to analyze complex phenomena using mathematical models] M.: Mann, Ivanov i Ferber, 2020.
13. Page S.E. What Sociologists Should Know About Complexity // Annual Review of Sociology. Annual Reviews Inc., 2015. Vol. 41, № 1. P. 21–41.
14. Miller J.H., Page S.E. Complex adaptive systems : an introduction to computational models of social life. Princeton University Press, 2007. 263 p.
15. Romashevskaya N.M., Migranova L.A., Toksandaeva M.S. Cheloveveskiy i trudovoy potentsial rossiyskikh regionov [Human and labor potential of Russian regions]. Narodonaselenie. 2014. Vol. 3, № 65. P. 106–119
16. Patutina E.S. Osnovnye podkhody k traktovke ponyatiy «trudovogo potentsiala» i «chelovecheskogo potentsiala» kak osnovy kachestva rabochey sily v trudakh otechestvennykh i zarubezhnykh uchenykh [The main approaches to the interpretation of the concepts of "labor potential" and "human potential" as the basis of the quality of labor force in the works of domestic and foreign scientists]. NAUKA. ISSLEDOVANIYa. PRAKTIKA. Sbornik izbrannykh statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. 2020. 2020. P. 215–220.
17. Ogiy O.G., Tristanov A.B. Metodologicheskaya baza issledovaniya trudovogo potentsiala regiona [Methodological basis for the study of the labor potential of the region] Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6-ti tomakh. Kaliningrad: BGARF FGBOU VO "KGTU," 2019. P. 722–726.
18. Shkurkin A.M. Potentsial truda territorii: ucheb. Posobie [The labor potential of the territory: textbook]. M.: Litagent Flinta, 2012.
19. Human resources management: concepts, methodologies, tools, and applications. Pennsylvania: IGI Global, 2012. 1513 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Оксана Геннадиевна Огий, 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. Ogiy, Ph.D. (Social), Assistant Professor, First Vice-Rector, Kaliningrad State Technical University, Sovietsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russia, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Василий Юрьевич Осипов, доктор технических наук, профессор, и.о. директора СПИИРАН, СПб ФИЦ РАН, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, дом 39, e-

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

Александр Борисович Тристанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236022, Россия, г. Калининград, Советский пр., 1, e-mail:

Alexander B. Tristanov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, head of applied math and information technology department, Kaliningrad State Technical University, Sovietsky prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russia, e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Наталья Александровна Жукова, доктор технических наук, доцент; старший научный сотрудник, СПб ФИЦ РАН; 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, дом

Natalia A. Zhukova; Dr..Sci. (Eng), Assistant Professor; Senior Researcher; St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14-th Linia, VI, No. 39, St. Petersburg, 199178, Russia e-mail: nazhukova@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.10.2021
Принята к публикации: 15.11.2021

УДК 519.25:656.61.052

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.011>

Использование глобальной интегрированной информационной системы ИМО для исследования суточного распределения навигационных аварий

С.В. Ермаков¹, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru, П.А. Моисеев¹, e-mail: moiseev.pasha32@gmail.com

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассматривается глобальная интегрированная информационная система ИМО (Global Integrated Shipping Information System - GISIS) как инструмент для формирования суточных распределений навигационных аварий. Показана недостаточность и ограниченность подобной информации, представленной в источниках, и необходимость в ее наличии для проведения исследований, касающихся предотвращения навигационных аварий и человеческого фактора. Обоснована методика формирования суточного распределения навигационных аварий с использованием GISIS. Выявлено и решена проблема «нулевого часа», связанная с отсутствием указания в отчетах о расследовании аварий времени, когда она произошла. На основе информации, содержащейся в GISIS, сделаны выборки по каждому виду инициирующих событий (навигационных аварий) по каждому часу суток за 10 лет и составлены суточные распределения аварий, которые дали возможность принять гипотезу о детерминированности столкновений, посадок на мель, навалов и опрокидываний судна временем суток с пиком на первые два часа. Сформулирован ряд содержательных выводов о причинах вида полученных распределений.

Ключевые слова: GISIS, столкновения, посадки на мель, опрокидывания, навалы, суточные распределения, методика формирования.

Use of the IMO Global Integrated Shipping Information System to study the daily distribution of navigation accidents

Sergey V. Ermakov¹ e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru, Pavel A. Moiseev¹, e-mail: moiseev.pasha32@gmail.com

¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The article discusses the Global Integrated Shipping Information System (GISIS) as a tool for the formation of daily distributions of navigation accidents. The insufficiency and limitation of such information presented in the sources is shown, and the need for its availability for conducting research related to the prevention of navigational accidents and the human factor. The method of forming the daily distribution of navigation accidents using GISIS has been substantiated. Identified and resolved the "zero hour" problem related to the absence of an indication in the accident investigation reports of the time when it occurred. Based on the information contained in the GISIS, samples were made for each type of initiating events (navigation accidents) for each hour of the day for 10 years and daily distributions of accidents were compiled, which made it possible to accept the hypothesis of the determinism of collisions, groundings, contacts and capsizes of the ship by time with a peak for the first two hours. A number of meaningful conclusions about the reasons for the form of the obtained distributions are formulated.

Key words: GISIS, collisions, groundings, contacts and capsizes, daily distributions, method of forming.

Введение

Существующая методология оценки вероятности навигационных аварий характеризуется наличием множества концепций и подходов. Общим моментом практически для всех методов является использование для оценки вероятности некоторого пула факторов, которые принимаются во внимание и считаются детерминантами вероятности. Одним из таких факторов является время суток, в которое происходит плавание судна и для которого производится оценка вероятности. В некоторых моделях время суток учитывается – например, методика, представленная в [1], учитывает освещённость (daylight – day or night), в других моделях [2, 3] время суток игнорируется.

Очевидно, что время суток как таковое не имеет прямого обуславливающего значения для вероятности навигационных аварий, а определяет эту вероятность через человеческий фактор. Именно состояние вахтенного помощника капитана (ВПК) в определенные часы несения вахты (уровень его усталости), зависящее как от длительности вахты на момент оценки, так и от времени суток, в основном предопределяет то, случится или нет навигационная авария.

Исходя из этого, была, например, разработана математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения, представленная в [3]. Авторы предложили использовать в этой модели коэффициент человеческого фактора, значение которого уменьшается с течением рейса по экспоненциальному закону, а в течение суток меняется по синусоидальному закону [4]. При этом для определения амплитуды синусоиды авторы предлагают использовать статистику столкновений.

Таким образом, наличие адекватного суточного распределения навигационных аварий имеет большое значение в контексте исследования влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна и в частности, для математической формализации усталости ВПК. В свою очередь, настоящую работу необходимо рассматривать как часть исследований в этом направлении и возможную основу для развития различных аналитических моделей для оценки риска навигационных аварий (например, представленных в [5-8]).

Для построения суточного распределения необходим качественный статистический материал. Вместе с тем, использование готового материала представляется невозможным вследствие

отсутствия такового. Большое количество официальных и неофициальных организаций, учёных, занимающихся сбором и обработкой статистической информации по аварийности морского флота систематизируют и анализируют ее по множеству признаков, но не по времени суток. Одним из редких источников является книга А.Б. Юдовича «Предотвращение навигационных аварий морских судов» [9] 1988 года издания, в которой представлены диаграммы распределения по времени суток столкновений и посадок на мель. Однако по тексту книги непонятно – какая информация лежит в основе диаграмм.

В итоге, первичной задачей при построении суточного распределения навигационных аварий является сбор и систематизация статистической информации. Для решения этой задачи предлагается использовать базу данных ИМО, содержащейся в Глобальной интегрированной информационной системе (Global Integrated Shipping Information System – GISIS).

Таким образом, целью настоящей работы являлась оценка исследовательского потенциала GISIS и формирование суточного распределения навигационных аварий по информации, представленной в этой системе.

1. Глобальная интегрированная информационная система ИМО

Международная морская организация развивает Глобальную интегрированную информационную систему GISIS уже около полутора десятков лет (с 2005 года), постоянно совершенствуя ее. Вопросы функционирования GISIS дважды поднимались на уровне Ассамблеи ИМО, результатом чего стали резолюции А.1029 (26) [10] и А.1074(29) [11]. Цель системы – централизация и гармонизация сбора, обработки и публикации информации, касающейся морского судоходства. В настоящее время GISIS содержит 23 тематических модуля и предполагает три уровня доступа: публичный пользователь, государство-член ИМО, секретариат ИМО.

Одним из модулей GISIS является модуль по морским авариям и инцидентам (Marine Casualties and Incidents). Он содержит соответствующую информацию о происшествиях, полные отчеты о расследовании, представленные в ИМО сообщающими администрациями, а также анализ этих отчетов, которые направлены на выявление общих тенденций или проблем, которые могут иметь значение для судоходной отрасли. Однако ИМО указывает, что подтверждающие данные для содержащейся в модуле информации отсутствуют, и анализ не должен использоваться для каких-либо других целей.

Именно этот модуль и был использован для формирования статистической базы и построения распределения навигационных аварий по времени суток.

2. Методика формирования суточного распределения навигационных аварий с использованием GISIS

На первом этапе следует открыть интернет-браузер и в адресную строку ввести www.imo.org, т.е. адрес официального сайта Международной морской организации. В итоге в окне браузера появится

главная страница указанного сайта. Следует спуститься по этой странице ниже, найти меню ссылок на информационные ресурсы ИМО (Resources). Верхняя из ссылок принадлежит как раз системе GISIS.

Кликнув по ссылке, пользователь попадает на главную страницу GISIS, где находит и кликает по следующей ссылке – Marine Casualties and Incidents (рис. 1). После этого в окне браузера появится окно авторизации. Здесь пользователь может зарегистрироваться и (или) ввести данные своего аккаунта (авторизоваться).



Рис. 1. Главная страница GISIS

В следующем появившемся окне следует нажать на кнопку (выбрать) Advanced Search (рис. 2), а в появившемся окне перейти по ссылке Incident Summary, находящейся в левом верхнем углу окна (рис. 3).



Рис. 2. Выбор функции расширенного поиска



Рис. 3. Переход к диалоговому окну расширенного поиска (ссылка Incident Summary)

В открывшемся диалоговом окне необходимо ввести условия поиска (enter a search condition), поисковая система дает возможность установить девять видов условий (рис. 4) из раскрывающегося списка. Первоначально следует выбрать период (даты), информация за который интересует пользователя (с другой стороны не имеет принципиального значения порядок установления условий) - Incident date.



Рис. 4. Выбор вида условия поиска (Incident date)

Далее пользователю следует определиться (рис. 5) с тем - нужна ли ему конкретная дата (is), или некоторые период до конкретной даты включительно (is on or before), или некоторые период после конкретной даты включительно (is on or after), или период между двумя датами (is between).

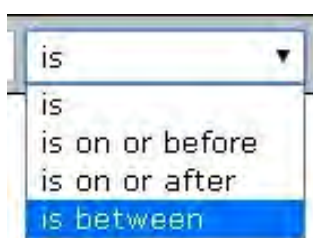


Рис. 5. Выбор характера промежутка дат

В контексте настоящего исследования представляет интерес последний вариант, т.к. выборка производится в отношении навигационных аварий, произошедших в течение 10 лет за период с 1.01.2010 г. до 1.01.2020 г. Именно эти даты необходимо ввести на следующем этапе, делая это поэтапно – сначала год (рис. 6), затем месяц и, наконец, число.



Рис. 6. Ввод даты

Тем самым условие по датам будет введено, и следует нажать кнопку Add с новым условием, каковым будет иницирующее событие (в контексте настоящей работы вид аварии). В появившейся строчке из выпадающего списка необходимо сначала выбрать условие Initial Event (рис. 7), а затем, в соседнем справа диалоговом окне само иницирующее событие, например, посадки на мель – Stranding / grounding (рис. 8).

Далее следует, нажав кнопку Add, добавить третью строку с условием поиска, каковым будет Incident time of day (время аварии, рис. 4) и указать это условие. Следующим шагом, аналогично тому, как это было сделано для дат, необходимо выбрать в выпадающем списке, что необходимое время будет указано конечным интервалом (is between), и ввести это время в соответствующие диалоговые окна. Тем

самым условия поиска введены полностью, и далее следует нажать кнопку Search. За считанные секунды система осуществит поиск и выдаст его результат в виде таблицы с перечнем аварий (рис. 9). Однако информация, отображенная в таблице, не представляет интерес для настоящего исследования в отличие от количества посадок на мель, произошедших в течение 10 лет в конкретный временной промежуток, равный одному часу. Это количество отображено на странице результатов поиска перед таблицей (рис. 9), именно это количество и фиксируется.



Рис. 7. Выбор иницирующего события (Initial event) в качестве условия

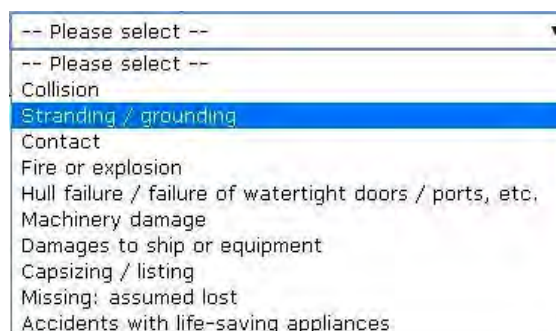


Рис. 8. Выбор типа иницирующего события

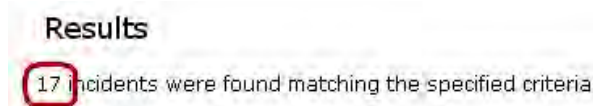


Рис. 9. Результаты поиска

Далее следует изменить условия поиска в части, касающейся временного промежутка. Для этого следует в соответствующей строчке с условием (Incident time of day) нажать кнопку Edit (рис. 10) и перейти к редактированию промежутка времени (в общем случае увеличив в соответствующих окнах количество часов на единицу). После того, как время будет введено, следует нажать кнопку Update (рис. 10) и получить количество навигационных аварий одного вида для следующего часа.

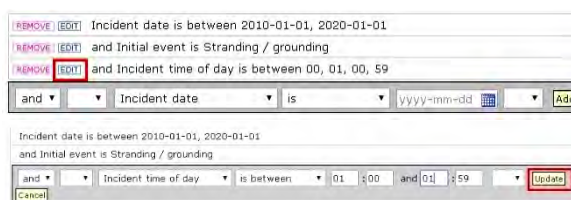


Рис. 10. Редактирование промежутка времени

Так, меняя промежутки времени, можно получить суточное распределение навигационных аварий одного вида. Для формирования суточного распределения других видов навигационных аварий необходимо выбрать соответствующее инициирующее событие.

3. Проблема «нулевого часа» и её решение

В процессе использования описанной выше методики была выявлена одна проблема. Количество аварий, приходящийся на первый час суток, т.е. на промежуток времени от 00:00 до 00:59, в разы превышала количество аварий в любой другой час суток. Так, например, в базе GISIS за период с 01.01.2010 по 01.01.2020 (т.е. за десять лет) содержится информация о 3826 авариях, из которых 728 (19,0%) приходятся на первый час суток, начиная с «нулей».

Источник этой проблемы заключается в том, что не все отчеты о морских авариях и инцидентах, предоставляемые органами расследования государств в GISIS, содержат информацию о точном времени аварийного случая. В результате анализа процедуры и особенностей выборки и оценки информации, представленной в отчетах, можно сделать вывод, что в таком случае система «записывает» в базу и принимает во внимание при поиске время 00:00. Таким образом, установив для первого часа суток промежуток времени 00:00-00:59 (или для последнего 23:01-00:00) пользователь получит не количество аварий и инцидентов, случившихся в этот час, а в сумме с ними количество аварий и инцидентов, время для которых не указано.

Природа «проблемы нулей» требует дальнейшего исследования и комплексного решения, которое должно минимизировать неопределенность содержащейся в GISIS информации в части, касающейся времени аварийного случая. Однако, обратившись к приведенному в системе краткому описанию аварий, для которых указано время 00:00, можно некоторым образом сформировать поверхностное понимание этой природы.

Так, утром 19 февраля 2019 года паром BREIZH NEVEZ 1, следуя из Груа в Лорьян (Франция), в условиях нулевой видимости сел на мель около Порт-Луи.

24 января 2018 года греческое бюро расследований заявило об обнаружении севшего на скалы небольшого рыболовного судна, причём экипаж на ней отсутствовал. В результате спасательно-поисковой операции в 22:30 на берегу в 200 метрах восточнее от места посадки на мель капитан судна был найден мертвым, само судно было вскоре разрушено волнами.

10 февраля 2018 года, примерно в 06:45, сотрудники Мальтийского бюро расследований уведомили власти, что около 06:15 танкер Nerphaestus сел на мель в координатах 35°57,62'N, 14°25,51'E около мыса Каура, Сент-Полс-Бэй, Мальта. В это время судно находилось в балласте. Предварительное расследование показало, что Nerphaestus, который находился на якоре в течение нескольких дней примерно в 1,5 морских милях от береговой линии, в районе бункеровки № 1, поднял свой якорь и при ветре 8 баллов (порывами до 10), в конце концов, сел на мель.

Для первого случая время указано приблизительно («утром»). Во втором случае очевидно, что без свидетельских показаний (которых, скорее всего, не было) время аварии установить невозможно. Судовая документация, думается, на этом рыболовном судне не велась должным образом.

Третий случай вызывает удивление. В сообщении время посадки на мель указано точно (и, что самое главное, достоверно), но GISIS по непонятным причинам это время не воспринимает.

Как правило, время происшествия не указывается в тех случаях, когда обязанность по выяснению обстоятельств аварии лежит на государстве с низкой культурой расследования морских аварий и инцидентов и неразвитым институтом расследования. Здесь ответственный орган предоставляет не подробное сообщение и не полноценный отчет о расследовании, а ограничивается малоинформативным уведомлением.

Вместе с тем, «проблема нулей» не является препятствием для использования GISIS в целях исследования суточного распределения морских аварий и инцидентов, т.к. она может быть решена следующим искусственным способом. При задании соответствующего критерия поиска из промежутка времени, содержащего момент 00:00, последний необходимо исключить, т.е. установить временной отрезок 00:01-00:59, как это представлено на рис. 10.

Конечно, исключая из поиска момент времени 00:00 (а он, очевидно, не попадет ни в какой интервал), пользователь может потерять некоторое число аварий первого часа, но вероятность этого мала, как и мало число аварий и инцидентов, случившихся ровно в полночь. Наоборот, включив 00:00 в поиск для первого или последнего часа, пользователь получит неадекватное распределение, делающее исследование бессмысленным, а его результат абсолютно недостоверным и предсказуемым. Здесь необходимо заметить также следующее:

1) вывод об описанной «системной ошибке» следует только из качественного анализа работы системы и не имеет своего подтверждения ни в одном официальном описании GISIS;

2) время с «одной минутой» устанавливается только для первого часа суток, для остальных указывается ровный час (с нулями), т.е. 01:00, 02:00 и т.д.

Если при стандартном вводе первого промежутка времени (т.е. 00:00-00:59) система, как это было показано ранее, выдавала для этого часа 728 аварий, то для промежутка 00:01-00:59 это число резко снизилось до 159.

Таким образом, «проблема нулей» в той мере, в которой это необходимо для исследования суточного распределения аварий, решена.

4. Формирование суточных распределений столкновений, посадок на мель, навалов и опрокидываний и их анализ

С использованием описанной выше методики была осуществлена выборка количества столкновений за каждый час суток в период с 01.01.2010 по 01.01.2020 и построены суточные распределения столкновений, посадок на мель,

навалов и опрокидываний, представленные в виде гистограмм на рис. 11-14.

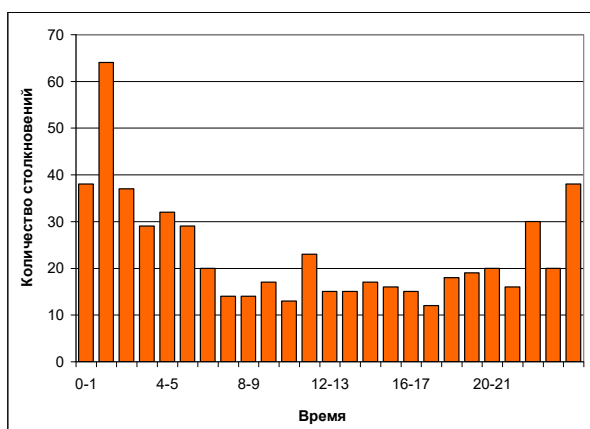


Рис. 10. Гистограмма суточного распределения столкновений

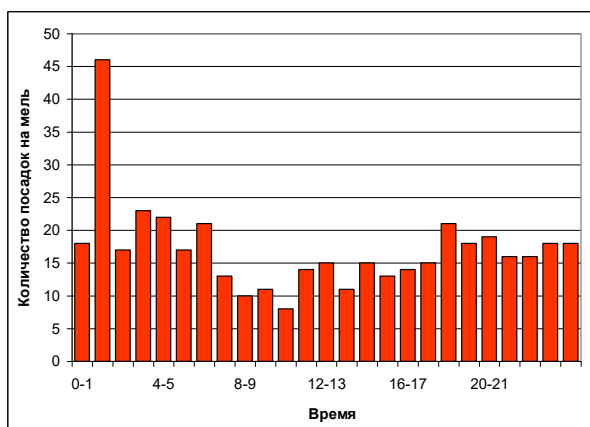


Рис. 12. Гистограмма суточного распределения посадок на мель

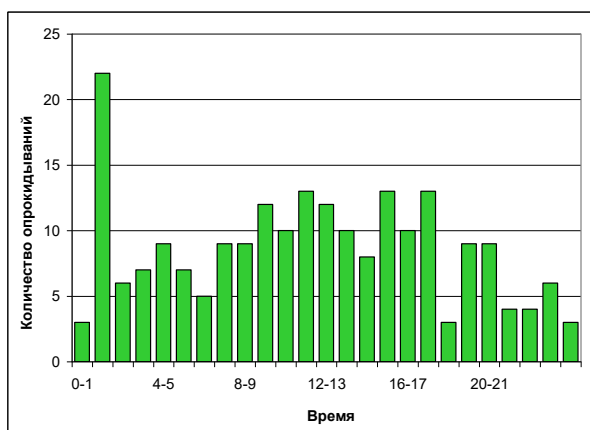


Рис. 13. Гистограмма суточного распределения опрокидываний

5. Анализ суточных распределений

По представленным гистограммам очевидно, что количество навигационных аварий зависит от времени суток. Однако для чистоты эксперимента, используя критерий согласия Пирсона (χ^2), была проверена гипотеза о равномерном распределении количества аварий.

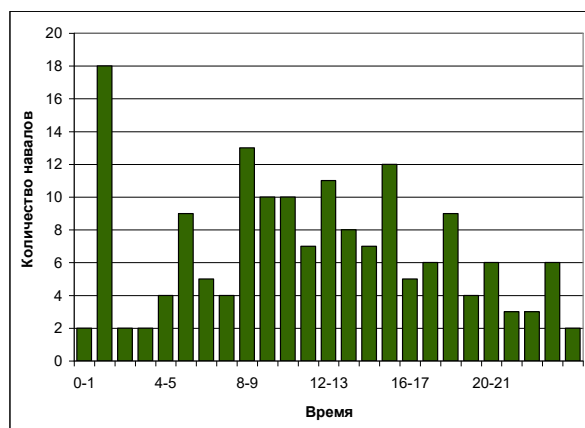


Рис. 14. Гистограмма суточного распределения навалов

С помощью MS Excel определено, что генеральные совокупности, из которых получены выборки, имеют равномерное распределение (т.е. количество аварий не зависит от времени) на очень малых уровнях значимости (табл. 1).

Таблица 1

Оценка равномерности суточных распределений

Вид аварии	α_{\max}	Var
столкновение	$2,55 \cdot 10^{-18}$	51,4
посадка на мель	$1,03 \cdot 10^{-6}$	42,3
опрокидывание	$3,58 \cdot 10^{-3}$	58,0
навал	$3,16 \cdot 10^{-4}$	47,1

Кроме того, для оценки равномерности распределения был использован коэффициент вариации, распространенный при статистических исследованиях в экономике [12, 13]. Он рассчитывается как отношение среднеквадратической погрешности величины m (в нашем случае, количества аварий на протяжении часа) к среднему количеству аварий в час $n_{\text{ср}}$ (естественно, из расчёта на 10 лет), выраженное в процентах [13]:

$$Var = \frac{m}{n_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

Чем больше коэффициент вариации, тем относительно больший разброс и меньшая выравненность изучаемых объектов. Изменчивость вариационного ряда принято считать незначительной, если вариация не превышает 10%, средней – если составляет 10-20%, значительной – если она больше 20%, но не превышает 33%. Если же вариация выше 33 %, то это говорит о неоднородности информации [12]. Таким образом, сопоставляя эти и расчетные значения из табл. 1, можно заметить, что количество аварий в час – величина изменчивая в рамках одних суток.

Полученные распределения позволяют сделать вывод, что навигационные аварии детерминированы временем суток, при этом наиболее опасным (пиковым) периодом для всех видов аварий являются первые два часа суток. Кроме того:

1) столкновения судов наиболее вероятны в промежуток времени от 22.00 до 06.00 с небольшим локальным пиком, приходящимся на час перед полуднем;

2) посадки на мель случаются чаще всего в вечернее и ночное время;

3) локальные пики навалов возникают на протяжении всех суток через 2-4 часа, при этом наиболее вероятны навалы (кроме периода с 00.00 до 02.00) в утреннее и дневное время (второй по величине максимум приходится на промежуток времени 08.00-09.00, третий – на 15.00-16.00);

4) опрокидывания кроме периода с 00.00 до 02.00 наиболее вероятны с 09.00 до 17.00.

В дополнение к указанным, абстрагированным от причин аварий четырем выводам здесь следует добавить следующие, коррелирующие с выводами А.Б. Юдовича [9]:

1) аварийность на вахтах разных помощников и в различное время суток имеет значительные различия. Здесь четко выделяется «пик», приходящийся на середину ночной вахты второго помощника капитана;

2) другая причина — не планируемый и не контролируемый отдых судоводителей, что хорошо иллюстрирует ночной «пик» посадок, приходящийся на вахту второго помощника. Через некоторое время после заступления на вахту неотдохнувший помощник капитана теряет остроту восприятия обстановки, становится менее активен, качество наблюдения резко ухудшается;

3) отсутствие системы дублирования и бесконтрольный отдых судоводителей, пренебрежение обычными предосторожностями – звенья одной цепи. Недаром подавляющее большинство аварий происходит именно с теми судами, где указанные недостатки проявляются систематически;

4) частота посадок при смене вахт выше, чем в другое время.

Заключение

При принятии решений, обосновании математических моделей, рекомендаций и различных организационно-правовых, технических и прочих мероприятий, чего бы они ни касались, нельзя основываться исключительно на интуиции. Фундаментом здесь должны быть цифры, факты, результаты исследований, ортодоксальная и порой консервативная теория. Та же интуиция

подсказывает человеку, не понаслышке знакомому с работой судоводителя, что вероятность аварии ночью больше, чем днем – рефлекторные механизмы нервной деятельности работают много медленнее. Впрочем, приходилось слышать и такое мнение, что ночью стоять ходовую навигационную вахту спокойнее и... безопаснее. Однако ни то, ни другое предположения ничего не стоят, пока они не обличены в цифры. Подобные цифры (а, точнее, числа) и исходящие из них выводы и стали итогом настоящей работы, в результате которой получены точные распределения столкновений, посадок на мель, навалов и опрокидываний.

Источником информации для формирования выборки послужила Глобальная интегрированная информационная система GISIS, являющаяся основной информационной базой и основным информационным источником Международной морской организации, в том числе и в части информации, касающейся морских аварий и инцидентов. Функционал соответствующего модуля GISIS позволяет сделать выборку аварий по различным критериям (условиям поиска), включая судовое время. Непосредственно поисковый интерфейс имеет интуитивно понятный характер, а методика выборки получила детализированное обоснование в рамках настоящей работы. В процессе этого обоснования была выявлена одна проблема, являвшаяся препятствием для обеспечения достоверности результата выборки – аварии и инциденты, для которых расследующий орган не указал время, учитываются в системе как произошедшие в 00:00. Однако эта проблема была в работе решена, и нет оснований считать полученные выборки недостоверными.

Анализ полученного суточного распределения дал основание принять гипотезу о детерминированности столкновений, посадок на мель, навалов и опрокидываний временем суток. Однако механическое использование результатов настоящего (и какого-либо подобного) исследования, например, в виде интеграции в модель пропорциональных частоте аварий коэффициентов нельзя считать оправданным. Увеличение частоты аварий в «опасные периоды» связано с человеческим фактором, а это требует исследований именно в этом направлении. Представленные результаты могут лечь только исключительно в подтверждение достоверности результатов таких исследований.

Литература

1. Hanninen M., Kujala P. The Effects of Causation Probability on the Ship Collision Statistics in the Gulf of Finland, *TransNav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2011, Vol. 4, № 1, 79-84.
2. Ермаков С.В. Метод формализованной оценки сложности навигационной ситуации // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2014. Вып. 4. С. 26–31.
3. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитровский В.А. Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 4(42). Т. 3. С. 11–18.
4. Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. Изучение структуры коэффициента, учитывающего человеческий фактор при навигационных авариях // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2019. Т. 11. № 3. С. 439–447.
5. Celik M., Cebi S. Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents, *Accident Analysis & Prevention*. 2009, Vol. 41, Is. 1, 66–75.

6. Macrae C. Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions, *Maritime Policy & Management*, 2009, Vol. 36, Is. 1, 21–38.
7. Martins M.R., Maturana M.C. Human error contribution in collision and grounding of oil tankers, *Risk Analysis: An International Journal*, 2010, Vol. 30, Is. 4, 674–698.
8. O'Neil W. The human element in shipping, *WMU Journal of Maritime Affairs*, 2003, Vol. 2, Is. 2, 95–97.
9. Юдович А.Б. Предотвращение навигационных аварий морских судов. М.: Транспорт, 1988.
10. IMO Resolution A.1029(26). Global Integrated Shipping Information System (GISIS). Adopted on 26 November 2009 [Электронный ресурс]. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1029\(26\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1029(26).pdf) (дата обращения: 31.09.2021).
11. IMO Resolution A.1074(28). Notification and circulation through the Global Integrated Shipping Information System (GISIS). Adopted on 4 December 2013 [Электронный ресурс]. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1074\(28\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1074(28).pdf) (дата обращения: 31.09.2021).
12. Сажин Ю.В., Иванова И.А. Эконометрика. Саранск, 2014.
13. Васнев С.А. Статистика. М.: МГУП, 2001.

References

1. Hanninen M., Kujala P. The Effects of Causation Probability on the Ship Collision Statistics in the Gulf of Finland, *TransNav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2011, Vol. 4, № 1, 79-84.
2. Ermakov S.V. Metod formalizovannoy otsenki slozhnosti navigatsionnoy situatsii [Method of formalized quantitative assessment of complexity of navigational situation], *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2014. Vyp. 4, S. 26–31.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. Matematicheskaya model' otsenki riska stolknoveniya v potoke sudov s proizvol'nym napravleniem dvizheniya [A mathematical model of collision risk assessment of vessels in an arbitrary direction], *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2018, № 4(42), T. 3, S. 11–18.
4. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. Izuchenie struktury koeffitsienta, uchityvayushchego chelovecheskiy faktor pri navigatsionnykh avariakh [Study of the structure of coefficient taking account the human factor under the navigation accidents]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2019, T. 11, № 3, S. 439–447.
5. Celik M., Cebi S. Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents, *Accident Analysis & Prevention*. 2009, Vol. 41, Is. 1, 66–75.
6. Macrae C. Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions, *Maritime Policy & Management*. 2009, Vol. 36, Is. 1, 21–38.
7. Martins M.R., Maturana M.C. Human error contribution in collision and grounding of oil tankers, *Risk Analysis: An International Journal*. 2010, Vol. 30, Is. 4, 674–698.
8. O'Neil W. The human element in shipping, *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2003, Vol. 2, Is. 2, 95–97.
9. Yudovich A.B. Predotvrashchenie navigatsionnykh avariya morskikh sudov [Prevention of navigational accidents of ships]. М.: Транспорт, 1988.
10. IMO Resolution A.1029(26). Global Integrated Shipping Information System (GISIS). Adopted on 26 November 2009. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1029\(26\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1029(26).pdf) (Accessed 31.09.2021).
11. IMO Resolution A.1074(28). Notification and circulation through the Global Integrated Shipping Information System (GISIS). Adopted on 4 December 2013 . URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1074\(28\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1074(28).pdf) (Accessed 31.09.2021).
12. Sazhin Yu.V., Ivanova I.A. Ekonometrika [Econometrics]. Saransk, 2014.
13. Vasnev S.A. Statistika [Statistics]. М.: MGUP, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Владимирович Ермаков, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, Калининградский государственный технический университет, 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru

Sergey V. Ermakov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the navigation department, Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru

Павел Алексеевич Моисеев, аспирант, Калининградский государственный технический университет, 236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: moiseev.pasha32@gmail.com

Pavel A. Moiseev, graduate student, Kaliningrad State Technical University, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation, e-mail: moiseev.pasha32@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

УДК 621.35

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.012>

Накопитель электроэнергии как средство регулирования электропотребления морского порта

А.Ю. Никишин¹, e-mail: nikduke@mail.ru, М.С. Харитонов¹, e-mail: mskharitonov@mail.ru,
Р.В. Зубавичюс¹, e-mail: infotech.zub@yandex.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В мире наблюдается рост роли технологий накопления электроэнергии в составе современных систем электроснабжения, работающих в рамках концепции умных сетей. К новым направлениям относится их использование в составе систем электроснабжения морских портов, которые до недавнего времени считались одними из самых консервативных. В работе рассмотрены основные предпосылки и тенденции развития систем электроснабжения морских портов. С использованием методологии Prisma представлены результаты анализа современных исследований в области устойчивого развития электроэнергетики морских портов. Определены современные и перспективные направления использования накопителей электроэнергии в системах электроснабжения морских портов. На примере Калининградского морского торгового порта рассмотрены особенности технологических отношений с точки зрения обмена мощностью и энергией с энергосистемой. Приведены результаты анализа электропотребления порта за период в один год, показаны особенности и выделены причины неравномерности суточных графиков нагрузки. С целью оценки возможных режимов работы накопителя электроэнергии предложен алгоритм обработки данных суточных графиков нагрузки. Показана роль прогнозирования электропотребления при использовании систем хранения электроэнергии и дан анализ зависимостей электропотребления от внешних факторов.

Ключевые слова: морской порт, тенденции развития, накопитель электроэнергии, микрогрид, система электроснабжения, анализ электропотребления.

Electrical storage systems as a tool for power consumption regulation of the marine port

Andrey Y. Nikishin¹, e-mail: nikduke@mail.ru, Maxim S. Kharitonov¹, e-mail: mskharitonov@mail.ru,
Roman V. Zubavichius¹, e-mail: infotech.zub@yandex.ru

¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. One of the modern global trends is the growing role of energy storage technologies as part of modern power supply systems operating within the framework of the smart grid concept. New research areas include energy storage systems introduction into power supply systems of seaports, which until recent times were considered as one of the most conservative. The paper considers the background and trends in the development of marine ports power supply systems. The paper provides the results of the modern research analysis in the field of sustainable development of the marine ports electric power industry obtained with the Prisma methodology. The existing and promising directions for the energy storage systems application in the power supply systems of marine ports have been identified. On the example of the Kaliningrad Sea Trade Port, the author considers the peculiarities of technological relations from the point of view of exchange of power and energy with the power system. The results of the analysis of the port's power consumption for a period of one year are given, the features are shown and the reasons for the unevenness of the daily load schedules are highlighted. In order to assess the possible modes of energy storage systems operation, an algorithm for processing the data of daily load curves is proposed. The role of power consumption forecasting for energy storage systems is shown and an analysis of the dependences of power consumption on external factors is given.

Key words: marine port, development trends, energy storage systems, microgrid, power supply system, power consumption analysis.

Введение

В мире наблюдается рост роли технологий накопления электроэнергии в составе современных систем электроснабжения, работающих в рамках концепции умных сетей [1]. С накоплением опыта эксплуатации они находят применение во все более узких областях. Широкий интерес представляет их использование в составе систем электроснабжения морских портов, которые до недавнего времени считались одними из самых консервативных [2]. В условиях наблюдающего логистического бума и экспоненциального роста объемов мировых морских перевозок вопросы внедрения современных технологий для обеспечения надежной, экономической и экологичной работы морских портов становятся чрезвычайно актуальными.

С 1996 года Европейская комиссия ежегодно формулирует рейтинг из десяти экологических

приоритетов для европейских портов, которые направлены на снижение негативного воздействия портов на экологию и биосферу (рис. 1) [3]. Одна из целей, формулируемых в стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года - обеспечение экологической безопасности морской среды и сохранения экосистем в Мировом океане при эксплуатации его ресурсов и пространств с учетом всех процессов природного и техногенного характера [4].

Качество воздуха в припортовой зоне является первоочередным приоритетом, поэтому концепция современного морского порта одной из базовых основ имеет снижение выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ [5]. Это достигается за счет внедрения современных систем электротранспорта и гибридных погрузочно-разгрузочных механизмов, возобновляемых источников электроэнергии (в частности, солнечных и ветровых электростанций,

размещенных на территории и в акватории порта), обеспечения берегового питания судов всех типов, управления спросом на электроэнергию, снижения объемов перетоков электроэнергии из береговой энергосистемы, питаемой за счет традиционных источников электроэнергии для сокращения их доли в покрытии электропотребления (рис 2) [6].



Рис. 1. Рейтинг «ТОП-10 экологических приоритетов европейских портов» по состоянию на 2021 год

Эти решения постепенно закрепляются в нормативной документации на международном и национальном уровне. В частности, к концу 2025 года, согласно Директиве 2014/94/EU [7] во всех европейских портах должны быть организованы возможности для берегового питания судов. Операторы и владельцы порта, в свою очередь, заинтересованы в снижении расходов на внедрение технологий и потребляемую электроэнергию. Использование накопителей электроэнергии может помочь в этом за счет организации переноса пиков потребления и снижения соответствующих затрат на заявленную мощность и объемы потребления.

Реализация нормальной работы такого рода многоагентной системы, с учетом интересов перечисленных сторон является сложной научно-технической задачей и невозможна без внедрения соответствующей системы накопления и хранения электроэнергии, осуществляющей буферизацию и поддержание баланса выработки и потребления активной мощности при общем стремлении к минимизации энергообмена с питающей энергосистемой [8], которая выступает в качестве резерва при покрытии основных нагрузок за счет возобновляемых источников.

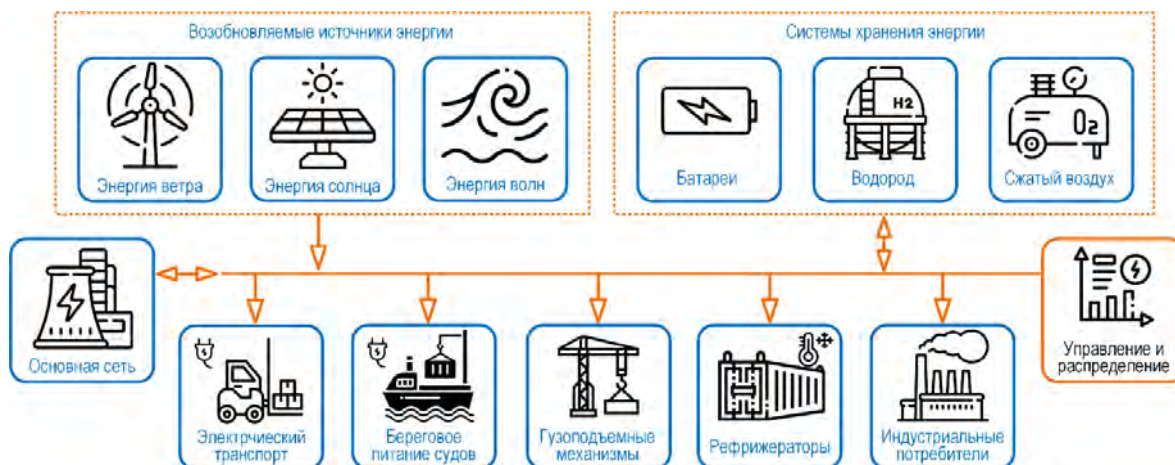


Рис. 2. Концепция организации электроснабжения современного морского порта

1. Анализ передовых достижений

Анализ литературы, посвященной использованию накопителей электроэнергии как элемента системы электроснабжения морского порта проводился в соответствии с базовыми принципами подхода PRISMA [4]. По результатам анализа объемов цитирования тридцати наиболее высокорейтинговых публикаций в разделе инженерные и компьютерные науки на пересечении категорий транспорт, электроэнергетика, устойчивая энергетика по базам данных Scopus, Web of Science и Google Scholar, к дальнейшему рассмотрению был принят ряд публикаций, индексируемых в Scopus (рис. 3.). Диаграмма с результатами отбора публикаций приведена на рис. 4.

Можно констатировать, что в мире сформирован значительный опыт эксплуатации систем накопления электроэнергии, основанных на различных принципах. Их преимущества, недостатки и перспективы использования рассмотрены в [9, 10].

Также можно выделить ряд публикаций, посвященных исследованиям работы в составе умных сетей [1, 11-13]. Однако работы, посвященные использованию накопителей электроэнергии в составе системы электроснабжения морского порта малочисленны [14-16], и затрагивают частные вопросы возможностей их применения для новых гибридных типов портовых кранов [17-19].

Google Scholar		
32		
2	51	2
4	8	1
Scopus		Web of Science

Рис. 3. Объемы цитирования 30 наиболее высокорейтинговых публикаций в рассматриваемых категориях по международным базам данных

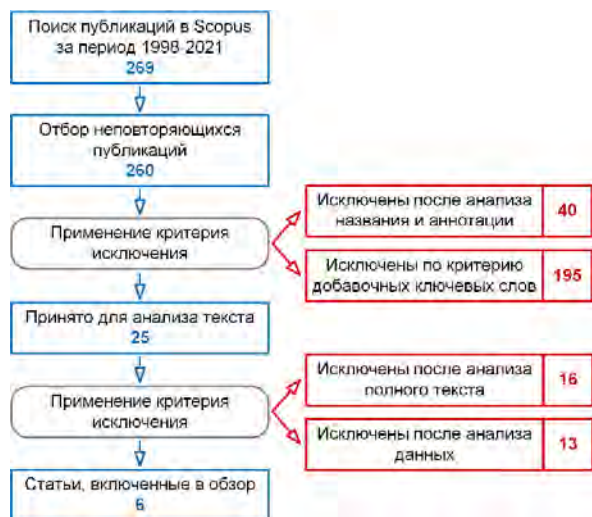


Рис. 4. Диаграмма отбора публикаций для обзора литературы по концепции PRISMA

При этом системы электроснабжения морских портов имеют свои существенные особенности, в частности: переменный характер нагрузки, который обусловлен режимом работы перегрузочных машин, сезонность электрических нагрузок и их связь с метеорологическими условиями, использование магистральных схем подключения потребителей, большая протяженность сетей низкого напряжения и существенные потери электроэнергии [2].

С учетом физического и морального состояния систем электроснабжения морских портов в России, за редким исключением, полноценное внедрение концепции современного умного порта – дело ближайшего, но будущего. Комплексная оценка функционирования такого рода многоагентной системы в существующих условиях затруднена из-за отсутствия исходных данных для моделирования. В этой связи актуальным направлением является исследование возможности внедрения отдельных технологий из вышеперечисленных и дальнейшее обобщение этого опыта.

В частности, следует оценить роль обобщенного накопителя электроэнергии в составе системы электроснабжения морского порта (рис. 5).



Рис. 5. Современные и перспективные направления использования накопителей электроэнергии в системах электроснабжения морских портов.

На первом этапе внедрения в существующие системы электроснабжения накопитель способен обеспечить перераспределение максимальных нагрузок для снижения затрат на электроэнергию при существующем тарифном регулировании, а также покрытие пиковых нагрузок для снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения. Перспективные направления, такие как оптимизация берегового питания судов, максимизация выработки на основе возобновляемых источников энергии и т.д. требуют более высокого уровня организации и информатизации системы электроснабжения.

Целью данной работы является предварительная оценка возможностей и перспектив применения технологии накопления электроэнергии при организации работы электропотребителей морского порта в нормальном режиме.

Объектом проводимого исследования является Калининградский морской торговый порт как субъект технологических отношений с точки зрения обмена мощностью и энергией с энергосистемой Калининградской области и субъект экономических отношений с точки зрения оплаты потребляемой электроэнергии.

2. Анализ тарифных условий

Для построения экономической модели оплаты за электроэнергию необходимо учесть особенность, связанную с расположением рассматриваемого объекта. Территория Калининградской области относится к неценовой зоне оптового рынка электрической энергии и мощности [20]. На таких территориях электрическая энергия (мощность) продается гарантирующими поставщиками по конечным регулируемым ценам (КРЦ), которые определяются и применяются в соответствии с разделами VII и XII положения функционирования розничных рынков электрической энергии [21].

В случае морского торгового порта суммарная установленная мощность электрооборудования превышает 670 кВт, и оплата совершается по тарифным условиям VI ценовой категории. Это означает, что потребитель должен организовать почасовое планирование и учет своего потребления, а отклонения от запланированных величин будут учитываться при расчете итоговой оплаты за потребленную электроэнергию соответствующими составляющими в КРЦ.

Итоговая цена включает в себя: оплату договорного объема потребления и отклонений по ставкам (потребленная электроэнергия); оплату генерирующей мощности (по ставке за мощность), определяемой как среднее за месяц из пиковых значений потребления мощности предприятием; оплату сетевой мощности (по ставке за мощность), определяемой как среднее за месяц из максимальных значений потребления предприятия в часы пиковой нагрузки для региона.

Построенная в соответствии с указаниями [21] экономическая модель взаимодействия объекта с гарантирующим поставщиком электроэнергии позволяет определять ожидаемый итоговый объем оплаты за потребленную электрическую энергию с учетом изменений, вносимых в график потребления накопителем электроэнергии.

3. Анализ электропотребления морского порта

Исследование режима электропотребления порта выполнено на основе анализа отчетных данных за период с июня 2020 по июль 2021 года. Усредненный на заданном периоде суточный график нагрузки представлен на рис. 6. Обобщенный анализ электропотребления представлен в виде тепловой карты на рис. 7 (увеличение зеленый-красный).

Анализ данных рис. 7 свидетельствует о существенной неравномерности суточных графиков нагрузки, снижающейся в зимний период в связи с ростом доли постоянных нагрузок в общем энергобалансе порта.

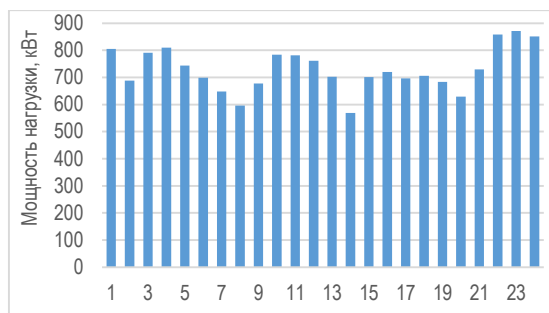


Рис. 6. Усредненный суточный график нагрузки

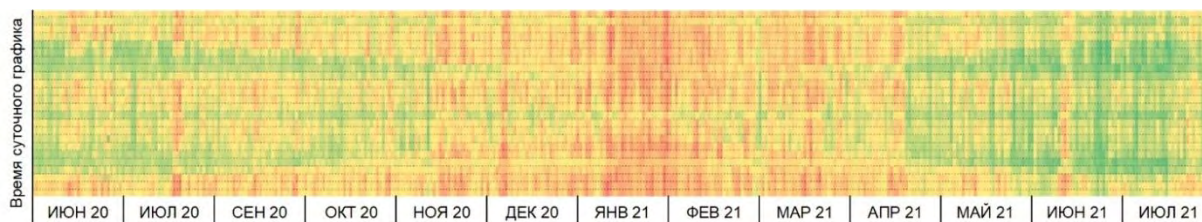


Рис. 7. Тепловая карта электрических нагрузок Калининградского морского торгового порта

Исследование структуры электрических нагрузок порта (табл. 1) указывает на существенную долю подъёмно-транспортного оборудования, режим работы которого увязан с обслуживанием судов и не находится в явной зависимости от времени суток, температуры окружающей среды или сезона, поскольку порт Калининград является незамерзающим.

Таблица 1

Структура электропотребления по системам порта

Система	Доля, %
Краны порталные	28,27
Рабочее освещение	9,55
Служебные помещения	2,15
Склады крытые	0,95
Рефрижераторные контейнеры	15,22
Службы механизации	1,09
Участок водо- и теплоснабжения	4,34
Очистные сооружения	3,88
Управление порта и контроль доступа	1,97
Арендаторы	32,58

Выявленная зависимость электропотребления порта от интенсивности обслуживания судов осложняет задачу прогнозирования нагрузок для построения аналитических моделей уже в среднесрочном периоде, что затрудняет расчеты требуемых параметров накопителей энергии и режимов их работы. Следует отметить, что, несмотря на наличие на причалах порта необходимой инфраструктуры, системы берегового питания судов на данный момент не используются в полной мере. Активное использование систем берегового питания в сочетании с работой погрузочного оборудования приведет к росту неравномерности графика нагрузки, что также должно учитываться при выборе подходов к разработке алгоритмов расчета режимов работы накопителей электроэнергии.

4. Разработка модуля расчета режимов работы накопителя электроэнергии

Предложенный подход в регулировании электропотребления предполагает использование накопителя для перераспределения максимумов потребления и сглаживания графика нагрузки порта относительно системы без существенного изменения режимов работы электрооборудования.

Для оценки режимов работы накопителя был разработан расчетный модуль в среде Mathcad, в основе которого лежит алгоритм поиска значения потребляемой из системы мощности, относительно которой производится сглаживание графика нагрузки с учетом величины потерь в накопителе (рис. 8).

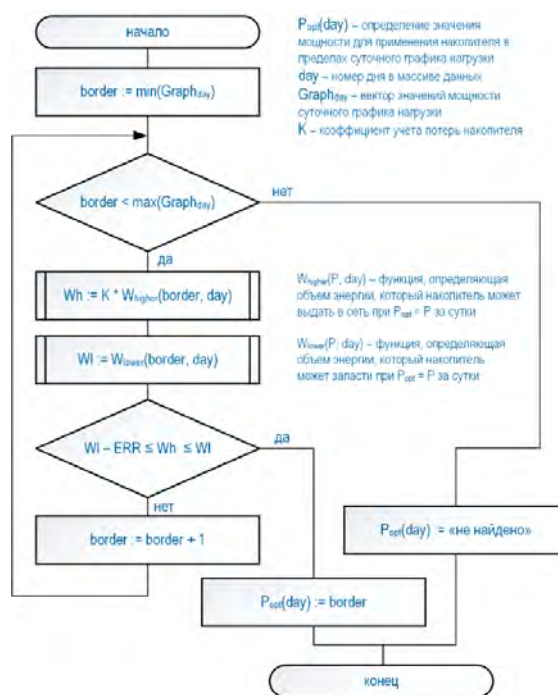


Рис. 8. Алгоритм работы расчетного модуля

Работа модуля начинается с задания дня «day», в соответствии с которым осуществляется импорт данных суточного графика нагрузки из известного массива «Graph». Поиск значения мощности для балансирования графика нагрузки « P_{opt} » ведется в пределах диапазона «border», граничные условия которого определяются как база и пик суточного графика нагрузки « $Graph_{day}$ ». Переменные W_{higher} и W_{lower} определяют объемы энергии, выдаваемой и запаасаемой накопителем без учета потерь. Уровень потерь энергии в процессе работы системы хранения в цикле «накопление-отдача» задается посредством регулирования коэффициента « K ». Величина допустимой погрешности в определении значения мощности « P_{opt} » задается параметром «ERR».

После определения значения « P_{opt} » вторая часть расчетного модуля производит сглаживание графика нагрузки: энергия запасается, когда нагрузка ниже « P_{opt} » и отдается, когда нагрузка превышает « P_{opt} ». При этом величина мощности, потребляемой портом из сети системы в течении суток, будет постоянной.

5. Проблемы прогнозов электропотребления

Предложенный расчетный алгоритм успешно прошел апробацию на основе отчетных данных по электропотреблению и позволяет давать оценку требуемых параметров накопителя для известной системы. Однако основная проблема эффективного использования накопителя связана с управлением его режимом в реальном времени и непрерывном планировании периодов накопления и отдачи энергии. Поэтому эффективное применение алгоритма невозможно без соответствующей предсказательной модели потребления.

В самом простом виде такая модель могла бы базироваться на использовании прогнозируемых метеоданных, которые широкодоступны и точны, в частности - температуре воздуха.

Проведенная оценка исходных почасовых данных электропотребления и температуры окружающего воздуха по критерию χ^2 не позволяет отклонить нулевую гипотезу о том, что распределение этих величин является нормальным с p -значением 0,95. Для наглядности на рис. 9 приведены графики квантиль-квантиль соответствующих распределений рядов исходных данных.

Это позволяет провести корреляционный анализ этих двух рядов по критерию Пирсона для различных интервалов осреднения, в качестве которых были выбраны: почасовой, посуточный, понедельный и помесечный. Результаты расчета соответствующих коэффициентов Пирсона приведены на рис. 10

Таким образом, при почасовом осреднении присутствует слабая отрицательная корреляция уровня потребления электроэнергии с температурой окружающей среды. В остальных вариантах осреднения присутствует средняя отрицательная корреляция между этими величинами.

Поскольку требования к детализации данных для работы расчетного алгоритма предполагают задание почасовых значений нагрузок, полученный уровень корреляции не позволяет предложить адекватную прогнозистическую модель, основанную лишь на использовании данных о температуре. Подобного рода модели могут быть получены с использованием методов искусственного интеллекта, что требует дополнительного изучения.

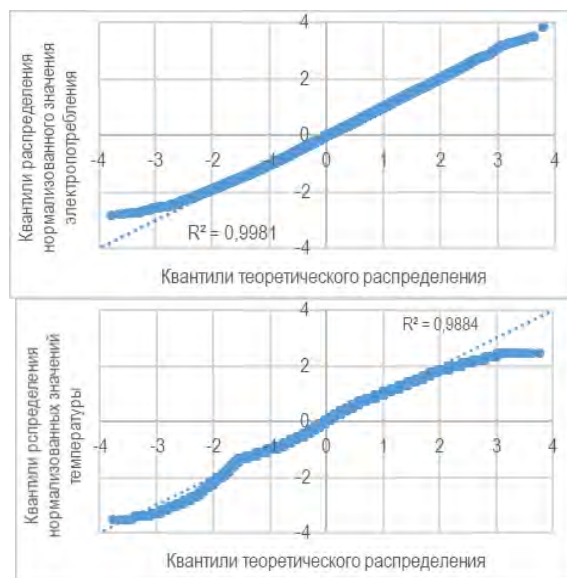


Рис. 9. Графики квантиль-квантиль распределения нормализованных значений почасовых рядов электропотребления и температуры воздуха



Рис. 10. Корреляционный коэффициент Пирсона для рядов данных электропотребления и температуры в зависимости от интервала осреднения данных

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Широкое внедрение возобновляемых источников энергии, систем берегового питания и электротранспорта в портах в настоящее время встречает технологические, экономические и законодательные барьеры. На этом фоне накопители электрической энергии могут стать первым этапом перехода к системам «смарт грид».

2. Использование накопителей для сглаживания графиков электрических нагрузок обеспечивает снижение затрат за счет оптимизации режима потребления электроэнергии из электрической сети. Итоговый срок окупаемости конкретного проекта будет определяться техническими и стоимостными показателями выбранной системы накопления.

3. Сглаживание графика нагрузки способствует снижению потерь при передаче электроэнергии от удаленных генерирующих установок на основе возобновляемых источников, которые, как правило, не могут быть размещены на территории порта ввиду ограниченности пространств.

4. Проведенные исследования и расчеты носят оценочный характер и требуют дальнейшего уточнения за счет учета более широкого спектра влияющих факторов, в частности режимов работы накопителя, структуры потерь электроэнергии, изменения режима электропотребления и пр.

Большой интерес для будущих исследований представляет прогнозирование электропотребления порта на основе прогнозов погодных условий на временных промежутках порядка недели и месяца для более точного управления режимами заряда и разряда накопителя. Для этого необходимо провести статистический анализ максимально доступного объема исторических данных потребления электроэнергии и погодных условий.

С учетом необходимости подачи заявки объемов потребления на сутки вперед, также существует потребность в создании предсказательной модели с

почасовым разрешением. Мировой опыт показывает, что такого рода модели используют в своей основе алгоритмы, построенные с использованием анализа больших данных методами искусственного интеллекта. Сложность реализации состоит в недостаточном объеме исходных данных для обучения моделей. С развитием систем АСКУЭ для накопления данных и алгоритмов их анализа можно ожидать все более широкого внедрения технологий накопления электроэнергии из-за роста экономического эффекта их применения.

Литература

1. Akinyele, D. O., & Rayudu, R. K. (2014). Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, 74-91. doi:10.1016/j.seta.2014.07.004
2. Nikishin, A. J., & Kharitonov, M. S. (2021, March). Modernization of marine ports electrical power supply systems in the framework of zero-emission strategy. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 689, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
3. ESPO. Green Guide. In *Toward Excellence in Port Environmental Management and Sustainability*; ESPO—European Sea Ports Organization: Espo, Finland, 2012; p. 7.
4. Распоряжение Правительства РФ «О Стратегии развития морской деятельности в РФ до 2030 года»
5. Barberi, S.; Sambito, M.; Neduzha, L.; Severino, A. Pollutant Emissions in Ports: A Comprehensive Review. *Infrastructures* 2021, 6, 114. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080114>
6. Харитонов, М.С., Никишин, А.Ю., Кажекин, И.Е. (2020). Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в системы электроснабжения морских устьевых портов. *Морские интеллектуальные технологии*, (4-2), 32-38.
7. Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure.
8. Beley, V., Nikishin, A., & Gorbatov, D. (2018, September). Strategy of Metropolis Electrical Energy Supply. In *International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications* (pp. 870-879). Springer, Cham.
9. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511-536. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.081
10. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312. doi:10.1016/j.pnsc.2008.07.014
11. Koohi-Kamali, S., Tyagi, V. V., Rahim, N. A., Panwar, N. L., & Mokhlis, H. (2013). Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 135-165. doi:10.1016/j.rser.2013.03.056
12. Kyriakopoulos, G. L., & Arabatzi, G. (2016). Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1044-1067. doi:10.1016/j.rser.2015.12.046
13. Wade, N. S., Taylor, P. C., Lang, P. D., & Jones, P. R. (2010). Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid. *Energy Policy*, 38(11), 7180-7188. doi:10.1016/j.enpol.2010.07.045
14. Colarossi, D., & Principi, P. (2020). Technical analysis and economic evaluation of a complex shore-to-ship power supply system. *Applied Thermal Engineering*, 181 doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115988
15. Lamberti, T., Sorce, A., Di Fresco, L., & Barberis, S. (2015). Smart port: Exploiting renewable energy and storage potential of moored boats. Paper presented at the MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World, doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271376
16. Yigit, K., & Acarkan, B. (2018). A new electrical energy management approach for ships using mixed energy sources to ensure sustainable port cities. *Sustainable Cities and Society*, 40, 126-135.
17. Alasali, F., Luque, A., Mayer, R., & Holderbaum, W. (2019). A comparative study of energy storage systems and active front ends for networks of two electrified RTG cranes. *Energies*, 12(9) doi:10.3390/en12091771
18. Flynn, M. M., McMullen, P., & Solis, O. (2007). High-speed flywheel and motor drive operation for energy recovery in a mobile gantry crane. Paper presented at the Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 1151-1157. doi:10.1109/APEX.2007.357660
19. Zhao, N., Schofield, N., & Niu, W. (2016). Energy storage system for a port crane hybrid power-train. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 480-492. doi:10.1109/TTE.2016.2562360
20. Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 №1172
21. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 №442

References

1. Akinyele, D. O., & Rayudu, R. K. (2014). Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, 74-91. doi:10.1016/j.seta.2014.07.004
2. Nikishin, A. J., & Kharitonov, M. S. (2021, March). Modernization of marine ports electrical power supply systems in the framework of zero-emission strategy. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 689, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.

3. ESPO. Green Guide. In Toward Excellence in Port Environmental Management and Sustainability; ESPO—European Sea Ports Organization: Espo, Finland, 2012; p. 7.
4. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF «O Strategii razvitiya morskoy deyatel'nosti v RF do 2030 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation "On the Strategy for the Development of Maritime Activities in the Russian Federation until 2030"]
5. Barberi, S.; Sambito, M.; Neduzha, L.; Severino, A. Pollutant Emissions in Ports: A Comprehensive Review. *Infrastructures* 2021, 6, 114. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080114>
6. Kharitonov, M.S., Nikishin, A.Yu., Kazhekin, I.E. (2020). Problemy integratsii vozobnovlyаемых istochnikov energii v sistemy elektrosnabzheniya morskikh ust'evykh portov [Problems of renewable energy sources integration in estuary marine ports power supply systems]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, (4-2), 32-38.
7. Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure.
8. Beley, V., Nikishin, A., & Gorbatov, D. (2018, September). Strategy of Metropolis Electrical Energy Supply. In *International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications* (pp. 870-879). Springer, Cham.
9. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511-536. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.081
10. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312. doi:10.1016/j.pnsc.2008.07.014
11. Koochi-Kamali, S., Tyagi, V. V., Rahim, N. A., Panwar, N. L., & Mokhlis, H. (2013). Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 135-165. doi:10.1016/j.rser.2013.03.056
12. Kyriakopoulos, G. L., & Arabatzis, G. (2016). Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1044-1067. doi:10.1016/j.rser.2015.12.046
13. Wade, N. S., Taylor, P. C., Lang, P. D., & Jones, P. R. (2010). Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid. *Energy Policy*, 38(11), 7180-7188. doi:10.1016/j.enpol.2010.07.045
14. Colarossi, D., & Principi, P. (2020). Technical analysis and economic evaluation of a complex shore-to-ship power supply system. *Applied Thermal Engineering*, 181 doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115988
15. Lamberti, T., Sorce, A., Di Fresco, L., & Barberis, S. (2015). Smart port: Exploiting renewable energy and storage potential of moored boats. Paper presented at the MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World, doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271376
16. Yigit, K., & Acarkan, B. (2018). A new electrical energy management approach for ships using mixed energy sources to ensure sustainable port cities. *Sustainable Cities and Society*, 40, 126-135.
17. Alasali, F., Luque, A., Mayer, R., & Holderbaum, W. (2019). A comparative study of energy storage systems and active front ends for networks of two electrified RTG cranes. *Energies*, 12(9) doi:10.3390/en12091771
18. Flynn, M. M., McMullen, P., & Solis, O. (2007). High-speed flywheel and motor drive operation for energy recovery in a mobile gantry crane. Paper presented at the Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 1151-1157. doi:10.1109/APEX.2007.357660
19. Zhao, N., Schofield, N., & Niu, W. (2016). Energy storage system for a port crane hybrid power-train. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 480-492. doi:10.1109/TTE.2016.2562360
20. Postanovlenie Pravitel'stva RF [Resolution of the Government of the Russian Federation] ot 27.12.2010 №1172
21. Postanovlenie Pravitel'stva RF [Resolution of the Government of the Russian Federation] ot 04.05.2012 №442

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Юрьевич Никишин, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: nikduke@mail.ru

Максим Сергеевич Харитонов, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1 e-mail: mskharitonov@mail.ru

Роман Виргиниевич Зубавичюс, студент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: infotech.zub@yandex.ru

Andrey Y. Nikishin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: nikduke@mail.ru

Maxim S. Kharitonov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: mskharitonov@mail.ru

Roman V. Zubavichius, student of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: infotech.zub@yandex.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2021
Принята к публикации: 15.11.2021

УДК 658.262; 658.512:005

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.013>

Методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса

О.Р. Кивчун¹, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru, В.И. Гнатюк¹, e-mail: gnatukvi@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье представлена методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса. Актуальность её разработки обоснована необходимостью повышения энергосбережения во всех отраслях региона для обеспечения экономической стабильности. Реализация этапов энергосбережения предполагает три направления: снижение и полезное использование энергетических потерь, модернизация и разработка электроустановок, использующих современные цифровые технологии и реализация научно обоснованных методов, моделей и методик, позволяющих существенно повысить энергоэффективность объектов региона. В рамках третьего направления была разработана третья методика. Теоретической основой методики является векторный ранговый анализ. Она включает в себя три расчётных блока: подготовки данных, расчёта добавочного ресурса и определения Z2-потенциала энергосбережения. Новизна методики заключается в реализации впервые разработанного математического аппарата на основе векторного рангового анализа, позволяющего при определении потенциала энергосбережения учесть внешнее управляющее воздействие вышестоящей энергосистемы. Это позволяет осуществить большую экономию денежных средств, которые расходуются на потери электроэнергии с целью модернизации электроустановок, внедрения новых технологий или премирование персонала.

Ключевые слова: методика, Z2-потенциал, энергосбережение, региональный электротехнический комплекс, добавочный ресурс, векторный ранговый анализ, MS-ценоз, трансформированное векторное ранговое распределение.

Method for determining the Z2-energy saving potential objects of the regional electrotechnical complex

Oleg R. Kivchun¹, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru, Victor I. Gnatyuk¹, e-mail: gnatukvi@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University

Аннотация. The article presents a methodology for determining the Z2-energy saving potential of objects of the regional electrical complex. The relevance of its development is justified by the need to increase energy conservation in all sectors of the region to ensure economic stability. The implementation of energy saving stages involves three directions: reduction and useful use of energy resources, modernization and development of electrical installations using modern digital technologies and the implementation of scientifically based methods, models and techniques that can significantly increase the energy efficiency of the region's facilities. Within the framework of the third direction, a third methodology was developed. The theoretical basis of the methodology is vector rank analysis. It includes three calculation blocks: data preparation, calculation of additional resource and determination of Z2-energy saving potential. The novelty of the technique lies in the implementation of a mathematical apparatus developed for the first time on the basis of vector rank analysis, which allows taking into account the external control influence of a higher power system when determining the energy saving potential. This makes it possible to save a lot of money that is spent on electricity losses in order to modernize electrical installations, introduce new technologies or award personnel.

Ключевые слова: methodology, Z2-potential, energy saving, regional electrotechnical complex, additional resource, vector rank analysis, MS-cenose, transformed vector rank distribution.

Введение

Одним из направлений повышения экономической стабильности регионов является реализация мероприятий по энергосбережению. Актуальность данных мероприятий обусловлена необходимостью поддержания энергобезопасности региона и его объектов. Отсюда вытекает основная цель энергосбережения – создание условий для повышения энергоэффективности во всех отраслях региона на различных этапах его функционирования.

В настоящее время все устройства, методы и программное обеспечение, связанные с энергосберегающими технологиями, применяются и реализуются в первую очередь. Это определено энергосберегающей политикой Российской Федерации [1].

Реализация этапов энергосбережения предполагает три направления: снижение и полезное использование энергетических потерь, модернизацию и разработку электроустановок,

использующих современные цифровые технологии и реализацию научно обоснованных методов, моделей и методик, позволяющих существенно повысить энергоэффективность объектов региона. Важным вопросом при реализации мероприятий энергосбережения на объектах региона является расчёт потенциала энергосбережения и определение стратегии его достижения.

С научной точки зрения в данном направлении проведено достаточно большое количество научных исследований. Методические аспекты определения потенциала энергосбережения были разработаны и реализованы в трудах В.Я. Ушакова, Н.Н. Харлова, П.С. Чубика, В. Беренса, Г. Бирмана, Д. Вольфберга, С. Разовский, Р. Фатхутдинов, Ф. Фодерс и др.

Однако в результате анализа основных способов и методов определения потенциала энергосбережения объектов региона установлено, что наиболее перспективными являются техноценологические. Их методологической основой является ранговый анализ, который впервые был предложен в середине

XX века профессором Московского энергетического института Б.И. Кудриным. В трудах его учеников представлен методы и методики определения потенциала энергосбережения и стратегий его достижения на основе методологии рангового анализа [2].

Работы профессора В.И. Гнатюка посвящены разработке методики оптимального управления электропотреблением, которая включает в себя процедуру потенцирования, позволяющую определять потенциал энергосбережения. Её отличительной особенностью является использование математического аппарата ранговых параметрических гиперболических распределений и ZP-анализа, позволяющего определить эффективный план энергосбережения [3].

Методика определения потенциала энергосбережения С.А. Дорофеева позволяет для исследуемой выборки параметра сформировать функциональные группы по предназначению объектов, рассчитать лидинговые параметры и на основе математического аппарата рангового анализа оценить потенциал энергосбережения [4].

В работах А.В. Тимченко рассмотрен метод определения потенциала энергосбережения с учётом номенклатурных ограничений. Его основой является уточняющая процедура ZP-нормирование, позволяющая пересчитывать параметр ресурса внутри функциональных групп на основе изменения номенклатуры электрооборудования [2,3].

Однако в их работах отсутствует математический аппарат, позволяющий учесть внешнее управляющее воздействие вышестоящей системы. Решение данного недостатка реализовано в рамках впервые разработанной методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса (РЭК), теоретической основой которой является векторный ранговый анализ.

1. Структура методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионального электротехнического комплекса

В ряде работ профессором В.И. Гнатюком введено и подробно описано понятие трансформированного рангового распределения (ТРР), под которым понимается распределение Ципфа в ранговой дифференциальной форме, полученное в результате целенаправленного изменения его формы, что позволяет учесть внешнее управляющее воздействие и, тем самым, уточнить процедуры интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования [1-5]. На данный момент трансформация ранговых параметрических распределений осуществляется двумя способами. Их основная суть представлена на рисунке 1.

Анализируя представленные способы, можно установить, что первый целесообразно применять при реализации процедуры потенцирования при определении потенциала энергосбережения и режимного нормирования. Второй – при реализации МС-прогнозирования.

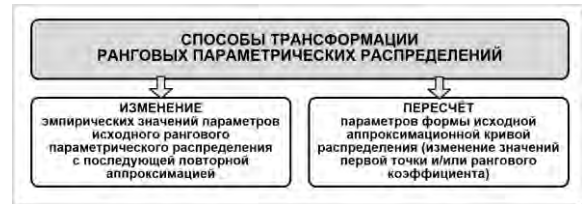


Рис. 1. Способы трансформации ранговых параметрических распределений

Таким образом, в рамках векторного рангового анализа, используя способ трансформации векторных ранговых распределений на основе изменения эмпирических значений параметров с последующей повторной аппроксимацией была разработана методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов РЭК. Она включает в себя три расчётных блока: подготовки данных, расчёта добавочного ресурса и определения Z2-потенциала энергосбережения (рис. 2).



Рис. 2. Основные блоки методики

При реализации подготовки данных по электропотреблению для расчётов из базы данных осуществляется импорт множества значений по электропотреблению объектов РЭК $W_k = \{w_i^k\}_{i=1}^n$ и значений по электропотреблению объектов МС-ценоза

$$W_{mc} = \{w_j^{mc}\}_{j=1}^p$$

Следует пояснить, что под МС-ценозом понимается взаимосвязанная совокупность электротехнических комплексов более высокого системного уровня, обладающая системными свойствами, в состав которой входит исследуемый электротехнический комплекс как подчиненный «дочерний» объект (МС-объект). Примером МС-ценоза может служить электротехнический комплекс Российской Федерации, в котором МС-объектами являются электротехнические комплексы регионов [2].

Алгебраическая запись исходных множеств может быть представлена следующей системой:

$$\begin{cases} W_k = \{w_i^k\}_{i=1}^n = \{w_1^k, w_2^k, \dots, w_n^k(t)\}; \\ W_{mc} = \{w_j^{mc}\}_{j=1}^T = \{w_1^{mc}, w_2^{mc}, \dots, w_T^{mc}\}. \end{cases} \quad (1)$$

(4.6)

где W_k – множество данных по электропотреблению объектов РЭК в течение промежутка времени t ;

W_{mc} – множество значений по электропотреблению макроценоза в течение промежутка времени t .

После операции импорта осуществляется построение векторного рангового распределения по значениям множества W_k . Далее реализуется этап построения нижней допустимой границы области допустимых значений (ОДЗ) для W_k . В результате данной операции формируется множество $A^3_{(p)} \{w^N_1, w^N_2, \dots, w^N_p\}_{p=1}^n$, представляющее собой нижнюю границу ОДЗ. На последующих этапах производится аппроксимация значений W_k и подмножеств $A^3_{(p)}$.

$$\left\{ \begin{aligned} W_k = \{w^k_{(i)}\}_{i=1}^n &\xrightarrow{Approx} W_k \left\{ w^k_{(i)} : S_1 = \frac{W1_k}{x^{(i)}_{(i)}} \right\}_{i=1}^n; \\ A^3_{(p)} = \{a^3_{(p)}\}_{p=1}^n &\xrightarrow{Approx} A^3_{ap} \left\{ a^3_{(p)} : S_2 = \frac{A1}{x^{(p)}_{(p)}} \right\}_{p=1}^n. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где W_k – множество аппроксимационных значений исходного векторного рангового распределения;
 A^3_{ap} – множество аппроксимационных значений нижней границы области допустимых значений;
 $W1_k; x^{(i)}_{(i)}$ – параметры аппроксимационного ВРР распределения множества W_k ;
 $A1; x^{(p)}_{(p)}$ – параметры аппроксимационного ВРР распределения множества $A^3_{(p)}$.

На рисунке 3 показан графический вид аппроксимации исходного ВРР, построенного по множеству W_k и значений нижней границы ОДЗ по множеству A^3_{ap} .

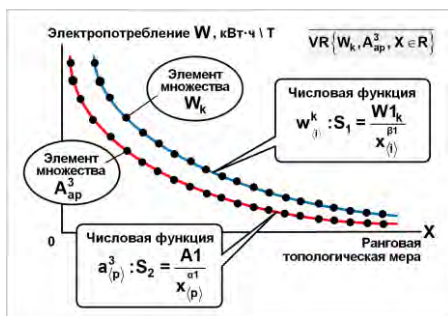


Рис.3. Графическое представление аппроксимационных распределений

На следующем этапе осуществляется вычисление криволинейного интеграла второго рода для ВРР, построенных по множествам W_k и A^3_{ap} . Для этого представим данные ВРР в виде гладких дуг AB и $A'B'$,

принадлежащих векторному ранговому пространству (рис. 4).

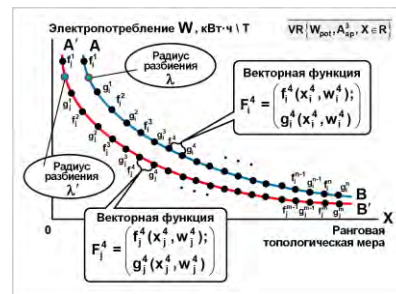


Рис. 4. Графическое представление векторных ранговых распределений в виде дуг

Кроме того, на протяжении длин дуг AB и $A'B'$ существует двумерное векторное поле заданное следующими векторными функциями:

$$\left\{ \begin{aligned} F_i(x_i, w_i) &= \begin{pmatrix} f_i(x_i, w_i); \\ g_i(x_i, w_i) \end{pmatrix} \in AB; \\ F_j(x_j, w_j) &= \begin{pmatrix} f_j(x_j, w_j); \\ g_j(x_j, w_j) \end{pmatrix} \in A'B'. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $f_i(x_i, w_i), g_i(x_i, w_i)$ – векторные функции двумерного векторного поля, распределённые непрерывно по AB ;

$f_j(x_j, w_j), g_j(x_j, w_j)$ – векторные функции двумерного векторного поля, распределённые непрерывно по $A'B'$.

Расстояние между действительными значениями ВРР (значениями параметра) можно представить в виде малых гладких дуг, каждая из которых будут иметь своё начало и конец по соответствующим значениям ранговой топологической меры

$$\left\{ \begin{aligned} AB &= f_i^1 g_i^1 \cup f_i^2 g_i^2 \cup \dots \cup f_i^n g_i^n; \\ A'B' &= f_j^1 g_j^1 \cup f_j^2 g_j^2 \cup \dots \cup f_j^m g_j^m; \\ AB, A'B' &\in VR, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где $f_i g_i, f_j g_j$ – промежуточные гладкие дуги.

Далее на каждой промежуточной дуге определяется точка. Для дуг $AB, A'B'$ данную операцию можно записать следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} f_i(x_i, w_i) &\in W_{i-1} w_i \forall i; \\ f_j(x_j, w_j) &\in W_{j-1} w_j \forall j. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где w_i, w_j – значения параметра;

x_i, x_j – значения ранговой топологической меры.

В каждой такой точке, возможно, провести вектор векторного поля и вычислить его значение. Следует отметить, данные векторы никак не соотносятся с конфигурацией дуг $AB, A'B'$. Кроме того, между

промежуточными дугами также возможно провести векторы. Назовём их хордами.

На следующем этапе рассчитывается интегральная сумма промежуточных значений на каждой дуге. Для этого необходимо сумму произведений значений произвольных точек (5) и хорд промежуточных дуг.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n F_1(x_i, w_i) \cdot |w_{i-1}w_i|; \\ \sum_{j=1}^m F_2(x_j, w_j) \cdot |w_{j-1}w_j|. \end{cases} \quad (6)$$

Если при бесконечном измельчении интегральных сумм (6) рассчитать предел, то можно будет вычислить интеграл под ВРР. Однако для этого вводится ещё один параметр – радиус-разбиения λ , который представляет собой значение или число, принадлежащее максимальной хорде дуги. Расчётные выражения для радиусов-разбиения дуг АВ и А'В' можно представить следующей системой:

$$\begin{cases} \lambda_{AB} = \max_i |w_{i-1}w_i|; \\ \lambda_{A'B'} = \max_j |w_{j-1}w_j|. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда криволинейные интегралы второго рода для АВ, А'В' можно будет вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} \int_{AB} f_i(x_i, w_i)dx + g_i(x_i, w_i)dw = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n F_i(x_i, w_i) \cdot |w_{i-1}w_i|; \\ \int_{A'B'} f_j(x_j, w_j)dx + g_j(x_j, w_j)dw = \lim_{\lambda' \rightarrow 0} \sum_{j=1}^m F_j(x_j, w_j) \cdot |w_{j-1}w_j|. \end{cases} \quad (8)$$

Вычисляя значения криволинейных интегралов в системе (8), можно рассчитать величину Z1-потенциала энергосбережения для объектов РЭК. Его величина будет равна разности данных интегралов:

$$Z1 = \int_{AB} f_i(x_i, w_i)dx + g_i(x_i, w_i)dw - \int_{A'B'} f_j(x_j, w_j)dx + g_j(x_j, w_j)dw. \quad (9)$$

На следующем этапе аналогичным образом реализуются алгоритмы построения и аппроксимации ВРР для МС-ценоза, а также для его нижней допустимой границы (рис. 5).

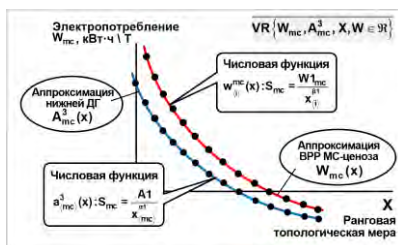


Рис. 5. Аппроксимационные векторные ранговые распределения МС-ценоза и нижней допустимой границы

Далее осуществляется расчёт значения векторной ранговой нормы для ранга исследуемого региона ВРР МС-ценоза и нижней допустимой границы.

Для расчёта добавочного ресурса на основе Z2-потенциала определяется место суммарного

значения электропотребления РЭК на ВРР МС-ценоза. Затем рассчитывается разность между данным значением и его нижней границей (рис. 6).

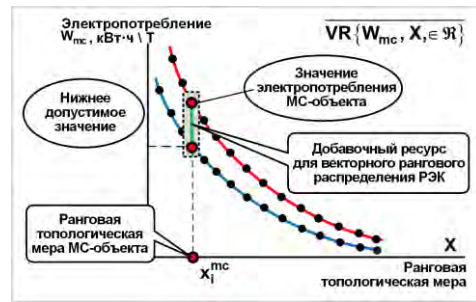


Рис. 6. Определения добавочного ресурса

В третьем блоке на основе выражений системы (10) осуществляется расчёт энтропии ВРР РЭК за последний год, вычисляется её среднее значение и определяются параметры $W1, \beta$.

$$\begin{cases} \{W_{k1}^{IN}, \beta^{IN}\} \xrightarrow{H_W^{BF}} \{W_{k1}^{BF}, \beta^{BF}\}; \\ \{W_k(x)\} \rightarrow \{W_{k1} \cdot x^{-\beta}\}; \\ n_{BF} = const; \\ Forec\{W_{k1} \text{ or } \beta\} \xrightarrow{H_W} W_{k1}^{BF} \text{ or } \beta^{BF}; \\ W_{k\Sigma}^{IN} + W_{AD} = \frac{W_{k1}^{BF}}{1 - \beta^{BF}} (n_{BF}^{1-\beta^{BF}} - 1), \end{cases} \quad (10)$$

где W_{k1}^{IN}, β^{IN} – первая точка и ранговый коэффициент векторного рангового распределения; W_{k1}^{BF}, β^{BF} – первая точка и ранговый коэффициент ВРР на бифуркационном этапе; n_{BF} – количество объектов на момент завершения бифуркационного этапа; $W_{k\Sigma}^{IN}$ – суммарное электропотребление РЭК на инерционном этапе.

Далее по полученным параметрам строится трансформированное ВРР и его ОДЗ. Затем определяется разность значений трансформированного ВРР и его нижней границы. Данная величина будет являться Z2-потенциалом энергосбережения для РЭК.

Таким образом, методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов РЭК представляет собой новый научно-методический аппарат, позволяющий учесть параметры внешнего управляющего воздействия МС-ценоза и существенно сократить ряд сложных математических операций, затрудняющих процедуру вычисления потенциала энергосбережения.

Заключение

Проверка работоспособности методики определения Z2-потенциала энергосбережения объектов РЭК осуществлялась на данных по электропотреблению крупных объектов припортового электротехнического комплекса Калининградской области.

В качестве исходных данных была использована информация об электропотреблении объектов припортового электротехнического комплекса Калининградской области с 2014 по 2019 г. На

рисунке 7 представлен фрагмент расчётного модуля, позволяющего реализовать методику.

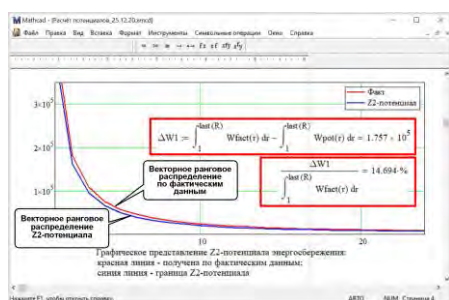


Рис. 7. фрагмент расчётного модуля получения Z2-потенциала

Из расчётов видно, что Z2-потенциал ВРР крупных объектов припортового электротехнического комплекса Калининградской области в 2019 году составлял 14 % от исходного электропотребления. Это значит, затраты на перерасход электроэнергии можно было использовать на модернизацию электроустановок, внедрение новых технологий, премирование персонала и т.д., при этом не нарушить технологический процесс функционирования объектов.

Литература

1. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ: трактат [Электронный ресурс]. Калининград: Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 2019. 126 с. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
2. Кудрин Б.И. Электроэнергетика сегодня и проблемы электрообеспечения потребителей // Промышленная энергетика. 2016. № 10. С.5-9.
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: монография. – 3-е изд., перераб. и доп. [Электронный ресурс]. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
4. Дорофеев С.А., Кивчун О.Р., Яфасов А.Я. Снижение электропотребления при эксплуатации объектов припортового электротехнического комплекса на основе оценки системного и объектного потенциалов энергосбережения / С.А. Дорофеев, О.Р. Кивчун, А.Я. Яфасов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3-1 (37). С. 142-148.
5. Viktor I. Gnatyuk, Gennady V. Kretinin, Oleg R. Kivchun, Dmitry V. Lutsenko. Potential of energy saving as a tool for increasing the stability. *International journal of energy economics and policy*. 2018. No 8 (1). P. 137 – 143.

References

1. Kivchun O.R. Vektorny`j rangovy`j analiz: traktat [Vector rank analysis]. *Kaliningrad: Izd-vo Kaliningradskogo innovacionnogo centra «Texnocnoz»*, 2019. 126 s. *Rezhim dostupa*: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
2. Kudrin B.I. E`lektroe`nergetika segodnya i problemy` e`lektroobespecheniya potrebitel'ej [Electric power industry today and problems of electrical supply to consumers]. *Promy`shlennaya e`nergetika*. 2016. No 10. S. 5-9.
3. Gnatyuk V.I. Zakon optimal`nogo postroeniya texnocenozov [The law of optimal construction of technocenoses]: monografiya. 3-e izd., pererab. i dop. [E`lektronny`j resurs]. *Kaliningrad: Izd-vo KICz «Texnocnoz»*, 2019. – *Rezhim dostupa*: <http://gnatukvi.ru/ind.html>.
4. Dorofeev S.A., Kivchun O.R., Yafasov A.Ya. Snizhenie e`lektropotrebleniya pri e`kspluatacii ob`ektov priportovogo e`lektrotexnicheskogo kompleksa na osnove ocenki sistemnogo i ob`ektnogo potencialov e`ner-gosberezheniya [Reduction of power consumption during the operation of the facilities of the port electrical complex based on the assessment of the system and object potentials of energy saving]. *Morskie intellektual`ny`e texnologii*. 2017. No 3-1 (37). S. 142-148.
5. Viktor I. Gnatyuk, Gennady V. Kretinin, Oleg R. Kivchun, Dmitry V. Lutsenko. Potential of energy saving as a tool for increasing the stability. *International journal of energy economics and policy*. 2018. No 8 (1). P. 137 – 143.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Романович Кивчун, кандидат технических наук, научный сотрудник Калининградский государственный технический университет, 236000, Калининград, Советский пр-т, д. 1, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Oleg R. Kivchun, Ph.D. (Eng), Researcher Kaliningrad State Technical University, 236000, Kaliningrad, Sovetsky Ave., 1, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Виктор Иванович Гнатюк, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: mail@gnatukvi.ru

Victor I. Gnatyuk, Dr. Sci. (Eng), Professor, professor of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Electric Power Industry, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: mail@gnatukvi.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 22.11.2021

УДК 620.9

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.014>**Оценка потенциала солнечной энергетики на объектах порта Калининград**М.С. Харитонов¹, e-mail: mskharitonov@mail.ru, Д.К. Кугучева¹, e-mail: kuguchevad@yandex.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В настоящее время из-за интенсивного роста морской торговли наблюдается тенденция развития морских портов. Прибрежные территории и районы расположения порта становятся источниками загрязнения, а техногенное воздействие на окружающую среду и возникающие при этом неблагоприятные воздействия на природную обстановку оказывают негативное влияние на среду обитания человека. Для снижения негативных воздействий на окружающую среду необходимо замещение ископаемых видов топлива возобновляемыми источниками энергии. Сегодня одним из перспективных направлений развития и совершенствования систем электроснабжения является применение фотоэлектрических панелей, благодаря которым можно достичь целей по обеспечению экологической безопасности морской среды. В статье описана методика аналитической оценки солнечного потенциала. На примере Калининградского морского торгового порта дана точная оценка количества поступающей солнечной радиации на поверхность фотоэлектрических панелей, проведен расчет эффективности применения различных способов установки фотоэлектрических панелей на территории порта и определены перспективы использования фотоэлектрических панелей с различными способами установки в качестве дополнительных источников генерации.

Ключевые слова: солнечная энергетика, морской порт, система электроснабжения, солнечный потенциал, фотовольтаика.

Assessment of solar energy potential at the facilities of the port of KaliningradMaxim S. Kharitonov¹, e-mail: mskharitonov@mail.ru, Darya K. Kugucheva¹, e-mail: kuguchevad@yandex.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Currently, due to the intensive growth of maritime trade, there is a tendency for the development of seaports. Coastal territories and port areas become sources of pollution, and man-made impacts on the environment and the resulting adverse impacts on the natural environment have a negative impact on the human environment. To reduce the negative impact on the environment, it is necessary to replace fossil fuels with renewable energy sources. Today, one of the promising directions for the development and improvement of power supply systems is the use of photovoltaic panels, thanks to which it is possible to achieve the goals of ensuring the ecological safety of the marine environment. The article describes a technique for analytical assessment of solar potential. Using the example of the Kaliningrad Commercial Sea Port, an accurate assessment of the amount of incoming solar radiation on the surface of photovoltaic panels is given, the effectiveness of using various methods of installing photovoltaic panels on the port territory is calculated, and the prospects for using photovoltaic panels with various installation methods as additional sources of generation are determined.

Key words: solar energy, seaport, power supply system, solar potential, photovoltaics.

Введение

Использование ископаемых видов топлива в портах и прибрежных районах отрицательно сказывается на окружающей среде и вносит значительный вклад в повышение средней температуры в нижних слоях Земли (парниковый эффект). Для снижения негативных экологических факторов и обеспечения экологической безопасности Мирового океана одним из перспективных направлений совершенствования систем электроснабжения морских портов является применение возобновляемых источников энергии. Использование фотоэлектрических панелей (ФЭП) на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных, целесообразных и востребованных способов производства электроэнергии на основе возобновляемой энергетики. Для портов, которые являются энергоемкими предприятиями, установка ФЭП требует наличия значительных площадей для обеспечения надежного и бесперебойного электроснабжения. Ввиду плотного расположения зданий и наличия ограниченного свободного пространства актуальной задачей является разработка современных и инновационных решений для повышения эффективности работы ФЭП в

процессе производства электроэнергии. Решение данной задачи возможно за счет максимизации выработки электроэнергии путем точного расчета количества возможного поступления инсоляции на поверхность ФЭП и определения оптимального способа установки фотоэлектрических панелей.

1. Характеристика объекта исследований

Морской порт Калининград является самым западным портом России и находится в ведении Калининградского управления Северо-Западного бассейна филиала ФГУП «Росморпорт». В состав объектов инфраструктуры порта входят терминалы для приемки судов, расположенные на побережье Калининградского морского канала, а также в городах Светлый, Балтийск и Калининград (рис. 1) [1].

Среди районов порта одними из наиболее нагруженных являются терминалы, расположенные в устье реки Преголя в черте г. Калининград. Операторами данных терминалов являются ОАО «Калининградский морской торговый порт» и «Калининградский морской рыбный порт», которые оказывают услуги по осуществлению погрузочно-разгрузочных работ, транспортно-экспедиторского обслуживания и складских операций [2].



Рис. 1. Схема расположения терминалов порта Калининград

Терминалы морских торгового и рыбного портов расположены во внутренних гаванях города Калининград (рис. 2), в связи с чем обеспечение мероприятий по снижению выбросов парниковых газов и других опасных соединений на территории терминалов за счет внедрения возобновляемых источников энергии является актуальной задачей.

Использование ФЭП в качестве дополнительного источника генерации позволит сократить опасные выбросы, а приближение источников электроэнергии к наиболее энергоемким объектам портов приведет к снижению потерь при передаче и повышению энергоэффективности системы электроснабжения на территории комплекса морских терминалов.



Рис. 2. Схема терминалов калининградского торгового и рыбного портов

2. Оценка потенциала солнечной энергии

Для определения потенциала солнечной энергии на территории рассматриваемого комплекса морских портов и моделирования режимов работы фотоэлектрических панелей необходим расчет часовых сумм приходящей на наклонную поверхность панелей солнечной радиации.

Оценка поступающей инсоляции в районе расположения морских торгового и рыбного портов (54°42 с.ш., 20°28 в.д.) основывалась на расчетах прямой и диффузной составляющих радиации при безоблачном небе. Дальнейшие этапы расчета позволили произвести уточнение солнечного потенциала за счет учета наклона принимающей поверхности и учета погодных условий, в частности облачности.

Плотность приходящего на поверхность ФЭП теплового потока прямого солнечного излучения определяется по выражению [3]:

$$S_{\text{накл}} = S_{\text{орт}} \cos \theta, \quad (1)$$

где $S_{\text{орт}}$ – прямое солнечное излучение на ортогональную лучам поверхность; θ – угол падения прямого солнечного излучения на поверхность ФЭП.

Величина прямого солнечного излучения, приходящего на ортогональную лучам поверхность, определяется согласно выражению [4]:

$$S_{\text{орт}} = \frac{S_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + c}, \quad (2)$$

где S_0 – солнечная радиация у верхней границы земной атмосферы; α – высота солнца над горизонтом; c – степень прозрачности атмосферы.

Для определения возможных сумм поступающей радиации был произведен учет реальной прозрачности атмосферы для условий Калининградской области. В целях получения удовлетворительных результатов расчета радиации коэффициент прозрачности атмосферы принят изменяющимся каждый месяц. Так, согласно [5], зимние месяцы характеризуются пониженной степенью прозрачности атмосферы с коэффициентами прозрачности 0,45 - 0,57, в то время как с марта по октябрь прозрачность атмосферы является идеальной и коэффициент с изменяется в довольно узком диапазоне 0,13 - 0,19.

У верхней границы земной атмосферы величина солнечной радиации S_0 равна:

$$S_0 = S_{0*} (1 + 0,033 \cos(\frac{360}{365} d)), \quad (3)$$

где S_{0*} - солнечная постоянная ($S_{0*}=1380$ Вт/м²); d – порядковый номер дня года.

Угол α , определяющий высоту солнца над горизонтом, рассчитывается из выражения [6]:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega, \quad (4)$$

где φ – географическая широта местности; δ - угол склонения солнца; ω – часовой угол.

Угол склонения солнца вычисляется по следующей формуле:

$$\delta = \delta_0 \sin(360 \frac{284 + d}{365}), \quad (5)$$

где δ_0 – максимальный угол склонения солнца, равный 23,45°.

Приходящий на горизонтальную поверхность поток рассеянной солнечной радиации вычисляется по выражению [7]:

$$D_{гор} = \frac{1}{3} (S_0 - \frac{S_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + c}) \sin \alpha \quad (6)$$

Поток диффузной солнечной радиации на наклонную поверхность равен:

$$D_{накл} = D_{гор} \cdot (0,55 + 0,434 \cdot \cos \theta + 0,313 \cdot (\cos \theta)^2) \quad (7)$$

Косинус угла падения прямого солнечного излучения на поверхность ФЭП определяется по выражению:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos s - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin s \cdot \\ & \cdot \cos \gamma + \\ & + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos s \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \\ & \cdot \sin s \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cdot \sin s \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega, \end{aligned} \quad (8)$$

где s – угол наклона конструктивного элемента к горизонту.

Общий поток солнечного излучения при безоблачном небе определяется по формуле:

$$Q_{накл} = S_{накл} + D_{накл} \quad (9)$$

Суммарный поток солнечной радиации меняется с изменением ориентации светоприемной поверхности. Согласно расчетам, выполненным по формулам (1 - 9), зависимость плотности падающего потока от угла наклона панели к горизонту является квадратичной, что позволяет с помощью подобранных в данной работе аппроксимирующих

выражений определить среднемесячную сумму поступающей на фотоэлектрическую панель солнечной радиации при любом угле наклона (s) принимающей поверхности при условии их расположения на территории рассматриваемого комплекса морских портов (табл. 1).

Таблица 1

Аппроксимирующие формулы для расчета среднемесячной поступающей на наклонную поверхность радиации при безоблачном небе

Месяц	Выражение для расчета среднемесячной радиации
I	$Q_{накл} = -0,0149s^2 + 2,4795s + 29,285$
II	$Q_{накл} = -0,0198s^2 + 2,8277s + 56,9266$
III	$Q_{накл} = -0,0338s^2 + 3,9070s + 133,1567$
IV	$Q_{накл} = -0,0373s^2 + 3,0229s + 208,1178$
V	$Q_{накл} = -0,0347s^2 + 1,5305s + 275,9409$
VI	$Q_{накл} = -0,0297s^2 + 0,5440s + 295,1940$
VII	$Q_{накл} = -0,0323s^2 + 1,0027s + 289,0946$
VIII	$Q_{накл} = -0,0371s^2 + 2,4884s + 238,4466$
IX	$Q_{накл} = -0,027s^2 + 2,8557s + 133,59$
X	$Q_{накл} = -0,0303s^2 + 4,0797s + 93,1960$
XI	$Q_{накл} = -0,0160s^2 + 2,5730s + 33,4605$
XII	$Q_{накл} = -0,0119s^2 + 2,0275s + 21,388$

На значение интенсивности солнечного излучения значительное влияние оказывает облачность. В связи с этим на следующем этапе исследования была проведена обработка массива данных с ближайшей к комплексу морских портов метеорологической станции г. Калининград №26702 за 2016-2020 гг. по количеству общей облачности в часы нахождения солнца над горизонтом [8]. Результаты проведенного анализа представлены в табл. 2. Согласно проведенному анализу, для исследуемого района характерна ежегодная повторяемость пасмурного неба в течение зимних месяцев, в которые средний балл общей облачности варьируется в диапазоне 6,8 – 7,9 баллов, что уменьшает эффективность применения ФЭП и ставит задачу нахождения способов максимизации количества поступающей инсоляции. В период весенне-летних месяцев имеется тенденция к увеличению повторяемости ясных дней и снижения общего балла облачности.

Согласно теории Т. Г. Берлянда [9], связь между величинами поступающей радиации и степенью облачности находится в следующей зависимости:

$$Q_{сумм} = Q_{накл} (1 - (a + b \cdot n) \cdot n), \quad (10)$$

где a, b – коэффициенты, равные 0,38 для 0-60° с.ш; n – общая облачность (в долях единицы).

По данным исследований массива данных с метеорологических станций Западной Европы и США, Д. Блек доказал следующую зависимость между облачностью и поступающей на землю солнечной радиацией:

$$Q_{сумм} = S_{накл} (0,8 - 0,34n - 0,46n^2) \quad (11)$$

Таблица 2

Рассчитанный средний балл общей облачности в районе расположения объектов за период 2016 - 2020 г

Год	Средний балл общей облачности по месяцам											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2020	7,7	6,4	4,8	3,7	4,7	5,0	5,0	3,7	3,6	5,7	7,8	7,6
2019	7,3	6,8	6,4	2,7	5,5	2,8	4,5	3,9	5,3	6,4	7,9	6,9
2018	6,9	7,6	5,3	2,5	3,1	3,1	4,8	3,5	4,2	7,1	7,6	7,8
2017	7,2	6,6	7,1	4,0	4,2	2,4	8,3	4,6	4,8	6,7	8,1	7,1
2016	8,1	7,9	8,1	5,7	2,5	2,6	5,9	5,8	3,6	8,5	7,1	8,3

Информационной базой для определения реального гелиоэнергетического потенциала местности являются данные радиационных характеристик, полученных по результатам многолетних наблюдений с помощью спутников либо с помощью актинометрических станций. Ввиду отсутствия измеренных или рассчитанных актинометрических данных о потоках солнечной радиации в районе расположения рассматриваемого комплекса морских портов для сравнения точности проведенных по различным методикам расчетов поступающей на наклонную поверхность солнечной энергии при наличии облачности были использованы электронные базы данных [10, 11].

Недостатком использования представленных программных продуктов является ограниченность данных для проведения точной оценки потенциала энергии солнца для определенной точки местности. Сопоставление известных и полученных новых данных представлены в табл. 3.

Таблица 3

Поступающая на наклонную поверхность суммарная солнечная радиация

	База данных [10]	Расчет для моделей	
		Т.Г. Берлянда	Д. Блека
Оптимальный угол	39	39	37
Месяц	Суммарная солнечная радиация, кВт/м ²		
I	35,57	39,63	22,61
II	49,91	54,17	33,66
III	83,68	87,66	51,14
IV	140,41	134,13	123,76
V	173,33	166,36	176,36
VI	166,85	158,10	169,98
VII	144,15	133,45	122,65
VIII	140,71	136,08	124,19
IX	122,57	117,33	124,98
X	69,40	73,60	37,67
XI	40,15	48,39	35,06
XII	25,17	30,35	15,82
Сумма	1191,90	1179,24	1037,87

Согласно расчетам, модель Т.Г. Берлянда наиболее точно описывает количество приходящей инсоляции на поверхность ФЭП, расположенных на территории рассматриваемого комплекса морских портов. Отклонение месячных расчетных значений интенсивности солнечной радиации от данных специализированного источника не превышает 10 %, что свидетельствует о достоверности полученных аналитическим методом расчетных значений.

3. Оценка влияния пространственной ориентации фотоэлектрических панелей

Увеличение показателей эффективности функционирования солнечных электростанций возможно достигнуть за счет выбора оптимальной пространственной ориентации ФЭП относительно горизонта. Положение гелиоприемника в пространстве должно быть оптимальным и определяться максимумом поступающего на принимающую поверхность светового потока. Поэтому для условий расположения солнечных панелей на территории рассматриваемого комплекса морских портов был проведен анализ поступающей солнечной радиации при различном способе установки фотоэлектрической панели:

- при ее фиксированной установке с постоянным наклоном под оптимальным к горизонту углом (39°);
- при ее установке с помесечным изменением оптимального угла (от 75° в январе до 19° в июне);
- при ее установке с ежедневным изменением оптимального угла (от 11° 11 июня до 86° 16 января);
- при ее установке с ежечасным изменением оптимального угла (от 0° до 88°);
- при осуществлении непрерывного слежения за солнцем по двум координатным осям с учетом постоянного расположения установки перпендикулярно потоку падающего излучения.

Определение оптимальных углов и дальнейшие расчеты проводились в разработанной программе расчета, построенной на основе описанной методики по оценке солнечного потенциала с учетом выражений (1 - 11) и данных таблиц 1, 2.

При установке неподвижного гелиоприемника положение принимающей поверхности в пространстве должно быть оптимальным с точки зрения максимума поступающей энергии. Азимут нормали к поверхности принимаем равным нулю. Согласно расчетам, поступающая на расположенную под углом 39° поверхность суммарная солнечная радиация для района расположения рассматриваемого комплекса морских портов составляет 2470,52 кВт/м² в год при ясном небе.

Согласно проведенным расчетам, ежемесячное варьирование угла наклона поверхности позволяет увеличить суммарное годовое количество приходящей солнечной радиации на 7,5 % по сравнению с неподвижной установкой, при этом в некоторые месяцы разница может превышать 20 %.

Переход на использование установки с ежедневным изменением угла наклона панели дает практически одинаковый эффект с установкой, использующей единый оптимальный угол наклона на весь месяц.

Использование почасового изменения угла наклона ФЭП позволяет увеличить ежедневный приход солнечной радиации на 6,24 % (значение для

июня) по сравнению с ежемесячным варьированием угла наклона и увеличение на 22,95 % по сравнению с использованием фиксированной установки под неизменным углом.

Так как варьирование угла падения солнечных лучей на принимающую поверхность оказывает большое влияние на интенсивность облучения ФЭП, использование непрерывной двухосевой системы слежения за солнцем является наиболее эффективным способом ориентации в пространстве приемной поверхности с точки зрения максимальной реализации имеющегося потенциала солнечной

энергии. Результатом применения данной системы для ФЭП на территории рассматриваемого комплекса морских портов является увеличение плотности потока солнечной радиации, поступающей при ясной погоде на принимающую поверхность, до 3427,6 кВт/м² в год, что соответствует максимально возможной величине доступного для использования суммарного солнечного потока.

Результаты исследования влияния различных способов установки фотоэлектрических панелей на значения поступающего солнечного излучения при ясной погоде представлены на рис. 3.

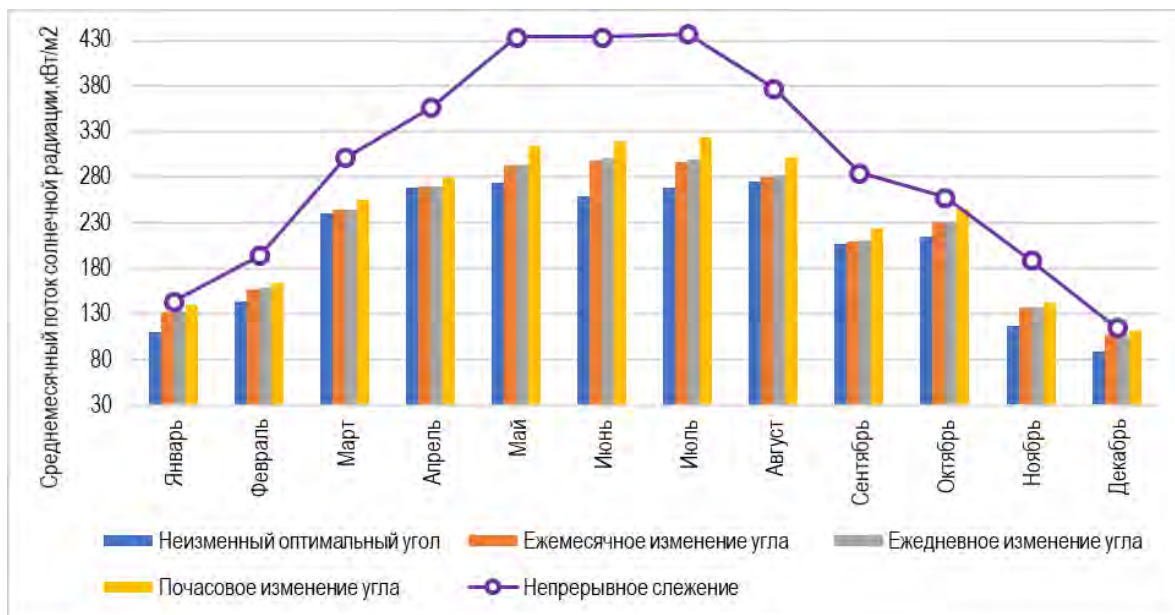


Рис. 3. Помесячное распределение прихода суммарной солнечной радиации при различных режимах работы гелиоприемника

Согласно результатам исследований, при использовании на территории рассматриваемого комплекса морских портов неподвижного гелиоприемника годовая сумма солнечной радиации при ясной погоде составляет 2470,6 кВт/м², ежемесячное варьирование угла наклона позволяет увеличить поток на 7,5 %, ежедневное варьирование угла – на 8,04 %, почасовое – на 14,27 %. Среднегодовой эффект от непрерывного слежения

достигает 42,79 % и составляет 3527,6 кВт/м² в год при ясной погоде. Анализ реальных погодных условий (табл. 2) позволяет рассчитать поступление солнечной радиации на фотоэлектрическую поверхность, расположенную на территории объекта и использующую непрерывную двухосевую систему слежения за солнцем. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета приходящей солнечной радиации на ФЭП с двухосевой системой слежения с учетом реальных погодных условий

Месяц/год	Поток за месяц, кВт/м ²				
	2016	2017	2018	2019	2020
I	53,47	61,01	63,33	60,22	56,93
II	74,89	88,43	77,93	86,45	90,36
III	111,42	129,40	155,02	140,25	160,82
IV	177,77	199,58	212,80	211,39	202,71
V	258,80	240,01	253,26	219,21	232,67
VI	258,02	259,31	252,97	255,88	227,61
VII	212,69	156,56	232,71	237,35	229,46
VIII	185,11	203,71	216,49	212,24	214,42
IX	162,36	151,70	157,54	146,23	162,61
X	89,93	115,92	110,51	119,77	128,07
XI	80,70	70,04	75,67	72,34	73,46
XII	41,16	49,65	45,06	50,89	46,42
Сумма	1706,30	1725,33	1853,30	1812,22	1825,54

Из-за большого количества пасмурных дней и высоких коэффициентов облачности, применение неподвижных ФЭП не позволяет полноценно использовать весь доступный солнечный потенциал. Согласно проведенным расчетам на основе архива метеорологических данных, применительно к территории рассматриваемых портов использование двухосевых систем слежения за солнцем позволит увеличить эффективность работы ФЭП в пределах от 122 % (октябрь 2016 г.) до 183 % (март 2020 г.). Таким образом, возможность применения двухосевых систем слежения за солнцем создаёт предпосылки для эффективного перехода портов к использованию ФЭП в качестве дополнительного источника генерации, а ввиду высоких значений количества возможного поступления инсоляции, существенные объемы электропотребления порта могут обеспечены «зеленой» электроэнергией при наличии возможности размещения ФЭП в порту.

Заключение

По результатам проведенных исследований предложена и апробирована методика расчета потенциала солнечной энергетики в части количества поступающей на поверхность ФЭП инсоляции на территории комплекса морских портов, расположенных во внутренних гаванях города Калининград. Согласно полученным результатам, при использовании неподвижно установленных ФЭП на территории порта годовая сумма солнечной радиации при ясной погоде составляет 2470,6 кВт/м², ежемесячное варьирование угла наклона позволяет увеличить поток на 7,5 %, ежедневное варьирование угла – на 8,04 %, почасовое – на 14,27 %. Среднегодовой эффект от непрерывного слежения достигает 42,79 % и составляет 3527,6 кВт/м² при ясной погоде и до 1825 кВт/м² с учетом реальных погодных условий.

Литература

1. Никишин А.Ю., Харитонов М.С., Никитакос Н. Перспективы использования возобновляемой энергетики в рамках концепции нулевого выброса порта Калининград. Материалы VIII Международного Балтийского морского форума. 2020. С. 110-118.
2. Калининградский морской торговый порт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kscport.ru>
3. Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. Солнечная энергетика: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 311 с.
4. Самойлов Д. В. Расчет величины поступления теплоты от солнечной радиации на поверхность Земли: методические указания. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 20 с.
5. Николаев А. А. Косвенные методы расчета характеристик солнечной радиации. Вестник Удмуртского университета. 2013. № 1. С. 130-134.
6. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Ленинградская область: Издательство Гидрометеиздат, 1968. 234 с.
7. Шакиров В. А. Методика оценки прихода суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов метеорологических данных. Системы. Методы. Технологии. 2017. № 4. С. 115-121.
8. [rp5.ru](https://clck.ru/XAEbP) Расписание погоды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clck.ru/XAEbP>
9. Гальперин Б. М. Сравнение и оценка некоторых климатологических методов расчета суммарной солнечной радиации по данным об облачности. Ленинградская область: Издательство Ленинградского гидрометеорологического института, 1965. 152 с.
10. Photovoltaic geographical information system [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://re.jrc.ec.europa.eu>
11. Power.nasa [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

References

1. Nikishin A.Yu., Kharitonov M.S., Nikitakos Nikitas. Perspektivy ispol'zovaniya vozobnovlyaemoy energetiki v ramkakh kontseptsii nulevogo vybrosa porta Kaliningrad [Prospects for the use of renewable energy in the framework of the concept of zero emission of the port of Kaliningrad]. Materialy VIII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. 2020. S. 110-118.
2. Kaliningradskiy morskoy torgovyy port [Kaliningrad trade marine port], <http://kscport.ru>
3. Vissarionov V. I., Deryugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. Solnechnaya energetika [Solar energy] : uchebnoe posobie. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008. 311 s.
4. Samoylov D. V. Raschet velichiny postupleniya teploty ot solnechnoy radiatsii na poverkhnost' Zemli [Calculation of the value of heat input from solar radiation on the surface of the Earth]. metodicheskie ukazaniya. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 20 s.
5. Nikolaev A. A. Kosvennyye metody rascheta kharakteristik solnechnoy radiatsii [Indirect methods for calculating the characteristics of solar radiation]. Vestnik Udmurtskogo universiteta. 2013. № 1. S. 130-134.
6. Sivkov S. I. Metody rascheta kharakteristik solnechnoy radiatsii [Methods for calculating the characteristics of solar radiation]. Leningradskaya oblast': Izdatel'stvo Gidrometeoizdat, 1968. 234 s.
7. Shakirov V. A. Metodika otsenki prikhoda summarnoy solnechnoy radiatsii na naklonnyye poverkhnosti s ispol'zovaniem mnogoletnikh arkhivov meteorologicheskikh dannyykh [Methods for assessing the arrival of total solar radiation on inclined surfaces using long-term archives of meteorological data]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2017. № 4. S. 115-121.
8. [rp5.ru](https://clck.ru/XAEbP) Raspisanie pogody [rp5.ru Weather schedule], <https://clck.ru/XAEbP>
9. Gal'perin B. M. Sravnenie i otsenka nekotorykh klimatologicheskikh metodov rascheta summarnoy solnechnoy radiatsii po dannym ob oblachnosti [Comparison and assessment of some climatological methods for calculating radiatsii po dannym ob oblachnosti [Comparison and assessment of some climatological methods for calculating

total solar radiation from cloudiness data]. Leningradskaya oblast': Izdatel'stvo Leningradskogo gidrometeorologicheskogo instituta, 1965. 152 s.

10. Photovoltaic geographical information system, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP

11. Power.nasa, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Максим Сергеевич Харитонов, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: msharitonov@mail.ru

Maxim S. Kharitonov, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of electrical equipment of ships and electric power industry, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: msharitonov@mail.ru

Дарья Константиновна Кугучева, аспирант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Darya K. Kugucheva, Graduate student of the Department of electrical equipment of ships and electric power industry, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021

Принята к публикации: 16.11.2021

УДК 004.93'1

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.015>

Разработка и обоснование структуры прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения

Р.К. Поляков¹, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

¹ Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, предметом которых являлась разработка и обоснование структуры прототипа программно-аппаратного комплекса технического зрения с использованием алгоритмов машинного обучения для предприятия пищевой промышленности. Ранее проведённые исследования показали, что современные алгоритмы машинного обучения способны эффективно анализировать и классифицировать изображения, как в статическом, так и в динамическом режиме. Исследования показали, что за последние десятилетия этой проблеме занимались как российские, так и зарубежные учёные. Обзор результатов исследований и функционирования пищевых промышленных предприятий, а также консервных комбинатов с точки зрения гарантированного выявления дефектов в производстве, свидетельствуют о целесообразности научных изысканий в данной области и указывают на актуальность дальнейшего совершенствования устройств и автоматизированных систем контроля герметичности консервов в условиях поточного производства. В статье раскрыты особенности разработки структуры прототипа, его функциональное описание, топологическая модель, морфологическая карта и его иерархическое описание, а также представлена структурно-функциональная схема автоматизации конвейерной линии.

Ключевые слова: техническое зрение, алгоритмы машинного обучения, программно-аппаратный комплекс, система, контроль качества

Development and substantiation of the structure of a prototype of a self-learning hardware and software complex for technical vision

Ruslan K. Polyakov¹, ruslan.polyakov@klgtu.ru

¹Kaliningrad state technical university, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a study, the subject of which was the development and substantiation of the structure of a prototype of a hardware-software complex of technical vision using machine learning algorithms for a food industry enterprise. Previous studies have shown that modern machine learning algorithms are able to efficiently analyze and classify images, both in static and dynamic modes. Studies have shown that over the past decades, both Russian and foreign scientists have dealt with this problem. A review of the results of research and the functioning of food industrial enterprises, as well as canning factories from the point of view of guaranteed detection of defects in production, indicate the expediency of scientific research in this area and indicate the relevance of further improvement of devices and automated systems for monitoring the tightness of canned food in continuous production. The article reveals the features of the development of the structure of the prototype, its functional description, topological model, morphological map and its hierarchical description, and also presents the structural and functional diagram of the automation of the conveyor line.

Keywords: technical vision, machine learning algorithms, software and hardware complex, system, quality control

Введение

Современные предприятия по производству пищевых продуктов, такие как рыбоперерабатывающие заводы, представляют собой довольно сложные единицы, которые включают в себя много автоматизации. Продукция и производственные процессы таких предприятий должна быть абсолютно герметичной и чистой, что предъявляет особые требования также к системе автоматизации и измерительным датчикам.

В пищевой промышленности высокая доступность автоматизации даже важнее, чем в других отраслях. Все производство осуществляется по заказам. Только полностью автоматизированные процессы, основанные на сложном контроле, могут гарантировать высокое качество продукции.

Ранее проведённые исследования показали, что современные алгоритмы машинного обучения способны эффективно анализировать и классифицировать изображения, как в статическом, так и в динамическом режиме. Уже сейчас многие исследователи используют искусственный интеллект, чтобы выявляя причины плохого

дорожного движения, повышая уровень утилизации отходов и даже экспериментируя с человеческим голосом.

Работы над собственным проектом машинного обучения может показаться пугающей, однако цель данной научной статьи показать, что разработка собственного прототипа программно-аппаратного комплекса технического зрения с алгоритмами машинного обучения весьма актуальная и востребованная рыночная задача.

Исследования показали, что за последние десятилетия этой проблеме занимались как российские, так и зарубежные учёные. В частности значительный вклад в развитие теории систем технического зрения внесли следующие российские учёные: Потапов А.А., Гуляев Ю.В. и др. [1]; Лукьяница А.А., Шишкин А.Г. [2]; Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В., Себряков Г.Г., Красильщиков М.Н. [3].

В мире данной проблематикой и применением современных алгоритмов машинного обучения занимались: Redmon J. [4]; Ren S., He K., Girshick R., Sun J. [5,6]; Dai J., Li Y., He K., Sun J. [7]; Liu W. et al.

[8]; Hong S. et al. [9]; Huang J., et al. [10]; Szegedy C., et al. [11]; Wu B., et al. [12].

Согласно ГОСТ 26790-85 «герметичность» – свойство изделия или его элементов, исключающее проникновение через них газообразных и (или) жидких веществ [14,13].

При этом «целостность банки» - способность банки доставлять потребителю безопасную и полезную пищу, и она может быть нарушена из-за большого количества дефектов. Эти дефекты могут возникать на различных этапах изготовления, наполнения, закрытия, обработки и обращения с банками до того, как банка попадет к потребителю.

Существует множество потенциальных дефектов банки. Это связано с тем, что при производстве банки и её наполнении требуется пройти много производственных этапов. Поэтому для оценки целостности банки требуется оперативная и достоверная информация с этих различных этапах.

Обзор результатов исследований и функционирования пищевых промышленных предприятий, а также консервных комбинатов с точки зрения гарантированного выполнения обозначенного ранее показателя, свидетельствуют о целесообразности научных изысканий в данной области и указывают на актуальность дальнейшего совершенствования устройств и автоматизированных систем контроля дефектов консервов в условиях поточного производства.

1. Разработка и обоснование структуры прототипа

Разработка комплекса контроля качества продукции невозможна в отрыве от реального производства и его потребностей. Поэтому для процесса разработки необходимо выбрать опорное предприятие, на котором в идеале и будет внедрен разрабатываемый программно-аппаратный комплекс с алгоритмами машинного обучения. Далее, в процессе разработки комплекса, необходимо наладить тесное взаимодействие с представителями предприятия и вести разработку исходя из их потребностей и реальных возможностей предприятия.

В качестве опорного предприятия для разработки системы диагностики было выбрано одно из крупнейших и старейших рыбоконсервных предприятий Калининградского региона ООО «Рыбокомбинат «За Родину». В ходе первичных переговоров получено согласие предприятия на участие в разработке комплекса, осмотрена производственная линия, получены образцы продукции.

С целью выявления наиболее проблемных участков в производственной цепочки ООО «РК «За Родину», было проведено исследование технологического процесса производства консервов предприятия. Данная работа позволила выявить наиболее проблемные и узкие места и более эффективно интегрировать разрабатываемый программно-аппаратный комплекс технического зрения с алгоритмами машинного обучения в конвейерную линию. В результате анализа было выявлено, что технологический процесс предприятия состоит из следующих групп операций: подготовительно-разделочную, технологическую, контрольную и упаковочную.

Ниже на рис. 1 автором статьи представлены базовые технологические операции и основные параметры, которые контролируются в производственном процессе при изготовлении консервов.

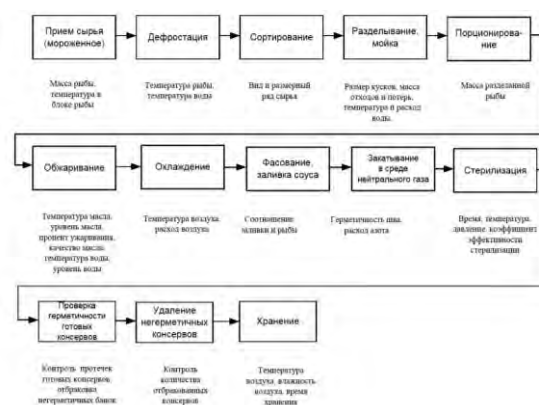


Рис. 1 - Основные технологические операции и измеряемые параметры в производстве консервов

Исследование, которое было проведено автором работы показало, что предприятие ООО «РК «За Родину» имеет существенную потребность в контроле качества продукции, что отражают характерные дефекты продукции с производства, которые представлены на рис. 2:



Рис. 2 - Характерные дефекты продукции в результате производства

Контроль качества жестяной банки может осуществляться путём непрерывного фиксации автоматическими средствами брака по следующим параметрам: качество закаточного и сварного шва, а также верхнего фланца корпуса банки; контроль геометрии и формы жестяной банки; локальные выделения на банках после стерилизации и др.

В этой связи точки контроля герметичности и отбраковки дефектных банок после основных технологических операций могут быть существенно расширены по сравнению с ранее приведенными. Это может быть достигнуто как раз с применением системы компьютерного зрения, которая будет своевременно извещать оператора о наличии брака.

На рисунке 3 показан осмотр производственной линии и определены основные точки, в которых можно применить разрабатываемый программно-аппаратный комплекс технического зрения.



Рис. 3 - Визуальный способ контроля герметичности и геометрии упаковки шпрот в масле

Следующий этап разработки - создание общей функциональной схемы программно-аппаратного комплекса. Основные требования - комплекс должен обеспечивать необходимое быстродействие и качество отбраковки, установленные техническим заданием по проекту. Далее на основе этой схемы производится подбор оборудования.

1.1 Структура прототипа

Устройство системы контроля герметичности консервных банок (УСКГ) является самостоятельным изделием интегрировавшая в себя электро-механическую, информационную, электронную и управляющую часть в единый много функциональный программно-аппаратный комплекс технического зрения с алгоритмами машинного обучения.

Разработка данного комплекса с алгоритмами машинного обучения для оценки дефектов банок на рыбоконсервном производстве ООО «РК «За Родину» в условиях поточного производства предполагает научное обоснование его структуры.



Источник: Разработано автором

Рис. 5 - Описание операций топологической модели

На основе перечня операций построена морфологическая карта возможных вариантов устройства определения дефектной консервной банки, представленная в табл. 6.

На рис. 4 приведено обобщенное функциональное описание УСКГ, в рамках которого произведено схематичное моделирование программно-аппаратного комплекса в условиях поточного производства связанно с построением процесса его работы, обеспечением надежности, а также описания целого ряда механических, энергетических, информационных, электронных и иных процессов.



Источник: Разработано автором

Рис. 4 - Функциональное описание устройства - системы контроля герметичности консервных банок

Для построения формализованных моделей представления УСКГ используются следующие подходы:

- **Метод теории графов.** Данный метод применяется для анализа технологических процессов с целью выбраковки дефектных консервных банок, а также электронных схем и устройств.
- **Системный анализ сложных технических систем** - базируется на основе построения системных описаний устройства и анализе и обосновании технико-экономических параметров УСКГ.

Создание будущего устройства - системы контроля герметичности консервных банок, основывается на разработке набора функциональных описаний будущего устройства.

На рисунке 5 приведено описание основных операций топологической модели процесса выбраковки дефектных консервных банок.

Таблица 1
Морфологическая карта УСКГ

Наименование операции	Варианты технического решения
Удаление банок на линии дозирования	Плоская лента Транспортный конвейер Роликовый конвейер
Перемещать банку в плоскости XOY	Мануальный (частичный) конвейер Линейный конвейер Транспортный конвейер
Перемещать банку в плоскости XOZ	Мануальный (частичный) конвейер Линейный конвейер Транспортный конвейер
Смещение поперечной и продольной осей	Фрикционный (линейный) механизм Транспортный конвейер, ленточный Конвейерный транспортный датчик
Смещение поперечной и продольной осей	Система управления транспортом (линейный конвейер) Система управления транспортом (линейный конвейер)
Смещение поперечной и продольной осей	Линейный конвейер с ПДС-механизмом 3D-навигационный датчик (линейный конвейер для плоскостной профилировки)
Смещение поперечной и продольной осей	Линейный конвейер Дополнительный (линейный) конвейер Вращательный датчик
Выделение дефектных банок (дефектная банка)	Селективный транспорт с поперечной лентой Линейный конвейер с поперечной лентой Блокировка (линейный)
Смещение поперечной и продольной осей	Механический транспорт с поперечной лентой Линейный конвейер
Смещение поперечной и продольной осей	Линейный конвейер Фрикционный (линейный) механизм Вращательный датчик

На основе анализа морфологической карты и иерархического описания сформирована схема компоновки УСКГ.

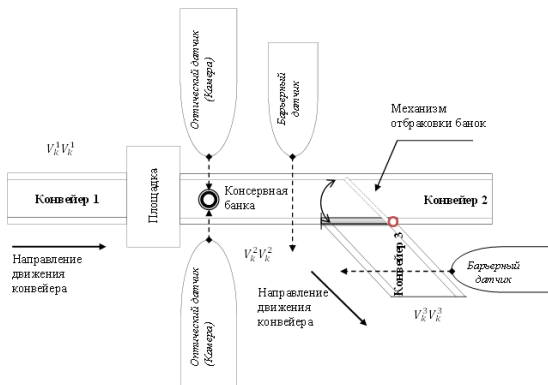
Морфологическая карта с описанием УСКГ представлена на рис. 6.



Источник: Разработано автором

Рис. 6 - Иерархическое описание УСКГ

На основании иерархического описания УСКГ была разработана технологическая схема конвейерной линии с элементами программно-аппаратного комплекса технического зрения, которая представлена на рис. 7.

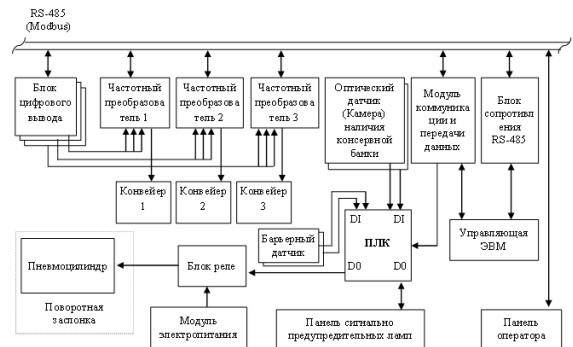


Источник: Разработано автором

Рис. 7 - Схема конвейерной линии с прототипом программно-аппаратного комплекса технического зрения на базе алгоритмов машинного обучения

Следующий этап разработки является создание подсистемы автоматизированного управления УСКГ на основе разработки специализированного программно-аппаратного комплекса.

Принципиальная структурно-функциональная схема автоматизации УСКГ представлена на рис. 8.



Источник: Разработано автором

Рис. 8 - Структурно-функциональная схема автоматизации конвейерной линии

Основное требование к создаваемому УСКГ это обеспечивать необходимое быстродействие и качество отбраковки. Далее на основе этой схемы производится подбор оборудования.

Рассматриваемая система прототипа состоит из следующих подсистем: технического зрения (ПТЗ), контроля качества (ПК) и сигнализации (ПС). Подсистема технического зрения, контролирует локальные выделения и деформацию (нарушения формы банки или закаточного шва), определяет чувствительность всей системы. Она же анализирует изменения в геометрии корпуса банки. Съёмка банки производится при помощи закрепленных с двух сторон на ленте транспортера видеокамерами одновременно.

Функции программного обеспечения:

1. Идентификация банок (упаковки).
2. Определения дефектов.
3. Информирование о наличии дефекта.
4. Сбор и обработка информации о количестве дефектных банок.
5. Удаленный доступ и обслуживания через сеть / Интернет.

Функции аппаратной части:

1. Модульная конструкция жестких и программных компонентов, с возможностью расширения.
2. Видеосъемка производится как с одной, так и одновременно двумя видеокамерами с двух сторон банки (количество камер зависит от производственной линии и технической возможности).
3. Интерфейс с удаленным доступом и обслуживания через сеть / Интернет.

Входные сигналы:

- положения закаточного шва;
- формы банок;
- локальные выделения на банках после стерилизации;
- дефекты влияющие на герметичность банок.

Выходные сигналы, информационные данные:

- сигнализация и оповещение производственного персонала при идентификации дефекта банки;

- сбор и обработка информации о количестве дефектных банок.

1.2 Изготовление прототипа

Исследуемый прототип программно-аппаратного комплекса технического зрения на базе алгоритмов машинного обучения предназначен для идентификации дефектов банки в условиях поточного производства на предприятиях пищевой промышленности (рыбной, мясной и плодоовощной),

с целью повышение качества и эффективности производства автоматизированных линий упаковки пищевых продуктов [16].

Исходя из назначения комплекса, а также исходя из спецификации элементов, автором статьи было подобрано оборудование.

В таблице 2 представлена ведомость покупных изделий, входящего в состав программно-аппаратного комплекса технического зрения на базе алгоритмов машинного обучения.

Таблица 5

Ведомость покупных изделий

N/N	Товары (работы, услуги)	Количество	
1.	ПР200-24.2.2.0 Программируемое реле	1	шт.
2.	БП60Б-Д4-24 Блок питания	1	шт.
3.	Реле промежуточное RP-403DLTU 24VDC,5A,250V LED, дублер	4	шт.
4.	Колодка для реле PYF-044BE/2	4	шт.
5.	Датчик ВБ3.18М.90.Т16000.х.1.В Sn 16000 мм, 10-30 VDC передатчик	1	шт.
6.	Датчик ВБ3.18М.90.Р.16000.2П.1. В Sn 16000 мм, NPN, 10-30 VDC приемник	1	шт.
7.	Панель оператора Wesop PI 3102H 10.2" с высоким разрешением процессор COPTEX A8 600 МГц, 128 МБ FLASH, 128 М DDII RAM Размер дисплея: 10,2 дюйма Разрешение: 1024 * 600 TFT LCD 260 000 цветов, LED Интерфейс: RS232 / RS485 / RS422 (доступно 2 COM порта), один порт Ethernet, USB HOST+ USB Client; USB printer/Seria1 port Printer Память: поддержка хранения данных, SD-карта, U диск	1	шт.
8.	Преобразователь частоты BD600-0R7G/1R5R-4 вход 3ФН 380У±15% 47Hz~63Hz мощность 0.75/1.5 kW, входной ток 3.4/5.0 А, выходной ток 2.5/3.7 А, регулируемый двигатель 0.75/1.5 kW	1	шт.
9.	Ящик установочный	1	шт.
10.	Монтажное оборудование	1	шт.
11.	Сборка ящика	1	шт.
12.	ПНЧ14 Фитинг прямой трубка D=8мм внут. резьба R/14	6	шт.
13.	ПНЧ96 Трубка полиуретановая PU TUBE 5*8*100	4	м
14.	ПНЧ96 Пневмоцилиндр DNC-32 Лштока 80	1	шт.
15.	ПНЧ86 Фитинг дроссель с обр. клапаном D=8 мм	1	шт.
16.	Компрессор масляный коаксиальный КМК -1600/50У, производительность 200л/мин., 1,5 кВт, 8 бар, 220 В	1	шт.
17.	Компьютер. Характеристики не ниже Intel Core i5, 16Gb, 1050 Ti 4Gb сеть.	1	шт.

При изготовлении прототипа закладывались следующие параметры:

Функции аппаратной части:

- Модульная конструкция жестких и программных компонентов, с возможностью расширения.
- Видеосъемка производится как с одной, так и одновременно двумя видеокамерами с двух сторон банки (количество камер зависит от производственной линии и технической возможности).
- Интерфейс с удаленным доступом и обслуживания через сеть / Интернет.

Количественные параметры и характеристики:

- время наработки на отказ – не менее 6000 ч.;
- высокая производительность - 3 600 объектов в час.;
- скорость съёмки CCD-камеры не менее 60 кадр/с.
- время диагностики одной герметичной упаковки от 1 до 2 сек

- работа 24\7

Конструктивные требования:

1. Массогабаритные характеристики:

- Общий вес программно-аппаратного комплекса самообучающейся системы технического зрения – до 30 кг. (в зависимости от защищённости корпуса компьютера и величины штативов для освещения)

2. Вид исполнения, товарные формы:

- Общие габариты в сложенном состоянии – до 1 кв. м.

Стандартные условия хранения систем на базе РС - влажность воздуха до 60%, температура от 0 до 30 градусов Цельсия.

Язык программирования Python, а также библиотеки «OpenCV».

Транспортировка и упаковка:

- Упаковка в картонную тару с противоударными пенопластовыми вставками.

- Транспортировка в условиях, исключающих удары, затопления и прочие повреждения системы.

Условия эксплуатации:

- Технологическое оборудование и технические средства располагаются в закрытом помещении.
- Температура окружающей среды 20 +/- 10 С
- Относительная влажность окружающей среды 65 +/- 10%.
- Абсолютное давление окружающей среды (8.36 – 10.6)*104Па.
- Симметричность расположения камер;
- Расстояние d между банками на ленте транспортера равняется диаметру банки и выбирается с учетом качественного сканирования каждой банки.

Требования по технике безопасности: Все технические средства автоматизации, питаемые от электросети, должны иметь надежное заземление, кроме того должно быть обеспечено удобство при ремонте и обслуживании.

На втором этапе в лабораторных условиях был изготовлен стенд конвейерной линии рыбоконсервного производства, осуществлено его подключение к электричеству, установлена кнопка пуска/стоп для контроля прохождением жестяных банок по конвейерной линии.

Далее был изготовлен штатив для установки камер и осуществлено его размещение у конвейерной линии. Так же произведён монтаж камеры фиксирующей наличие повреждений на жестяной упаковке банок.

На следующем этапе происходил монтаж автоматики программно-аппаратного комплекса.

Одновременно с этим происходила разработка программной части комплекса технического зрения [15].

Далее установлен компьютер, на который загружена компьютерная программа обработки данных с системы технического зрения.

2. Выбор архитектуры нейронной сети

На сегодняшний день эффективность современных программно-аппаратных комплексов, в первую очередь зависит от методов и алгоритмов, применяемых для анализа и классификации изображений.

Кроме того задача семантической сегментации изображений является одной из основных в прототипе программно-аппаратного комплекса технического зрения на базе алгоритмов машинного обучения с целью идентификации дефектов относительно герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства.

В рамках данного проекта автор статьи остановился на архитектуре Faster R-CNN Inception V2, так как она оптимальна по параметру скорости и точности. Метод Faster-RCNN используется для идентификации дефектов упаковки банки, а также для подтёков на ней. Архитектура Inception V2 используется из-за высокой точности среди архитектур сверточных нейронных сетей. Наилучшая скорость обучения и параметры эпохи для модели Faster R-CNN оптимизированы для улучшения распознавания дефектных банок в системе технического зрения.

Результаты работы программного обеспечения обученной модели переставлены в ранее опубликованной статье [17]. Полученные результаты работы программы и сам алгоритм был зарегистрирован в Роспатенте свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612636, «linterlik 1.0» и № 2019612635, «RCNN linterlik 1.0».

Заключение

В результате макетирования прототипа программно-аппаратного комплекса технического зрения на базе алгоритмов машинного обучения с целью идентификации дефектов упаковки банок на рыбоконсервном производстве ООО «РК «За Родину» в условиях поточного производства и в соответствии с программой и методикой испытания ПАКИ.466452.001.ПМ были получены следующие результаты:

Выбор в качестве архитектуры нейронной сети Faster RCNN Inception v2 оправдывает себя. Полученный прототип демонстрирует оптимальное сочетание скорости работы и точности детектирования и пригоден для применения в поточном производстве.

На компьютере с характеристиками не ниже Intel Core i5, 16Gb, 1050 Ti 4Gb сеть может быть обучена до точности 98-99% менее чем на 200 фотографиях поврежденной и 200 фотографиях целой продукции на разных частях конвейера. В условиях реального производства и многообразия повреждений понадобится не менее 1000 фотографий каждого вида.

К системе может быть подключен как монитор, извещающий оператора о наличии поврежденной продукции, так и любая система отбраковки (выталкивания) поврежденной продукции с конвейера. Итоговая точность составила 99%, максимальная скорость конвейера: 2 банки в секунду, время обучения модели на 400 фотографиях: 4 часа.

Макет может быть приведен в состояние действующего образца и использован для отбраковки продукции и/или остановки конвейера на реальном производстве.

Литература

1. Потапов А. et al. Новейшие методы обработки изображений/Под ред. АА Потапова // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. Vol. 496.
2. Лукьяница А., Шишкин А. Цифровая обработка видеоизображений-М.: Ай-Эс-Эс Пресс. 2009.
3. Козорез Д. et al. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. Litres, 2018.
4. Redmon J. YOLO: real-time object detection. University of Washington—CSE. 2018.
5. Ren S. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. 2015. Vol. 28. P. 91–99.

6. Ren S. et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. IEEE, 2016. Vol. 39, № 6. P. 1137–1149.
7. Dai J. et al. R-fcn: Object detection via region-based fully convolutional networks. 2016. P. 379–387.
8. Liu W. et al. Ssd: Single shot multibox detector. Springer, 2016. P. 21–37.
9. Hong S. et al. PVANet: Lightweight deep neural networks for real-time object detection // arXiv preprint arXiv:1611.08588. 2016.
10. Huang J. et al. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. 2017. P. 7310–7311.
11. Szegedy C. et al. Scalable, high-quality object detection // arXiv preprint arXiv:1412.1441. 2014.
12. Wu B. et al. Squeezedet: Unified, small, low power fully convolutional neural networks for real-time object detection for autonomous driving. 2017. P. 129–137.
13. Энциклопедия-М Б.С. Советская энциклопедия. 1969—1978 // Т. 1972. Vol. 7. P. 608.
14. ГОСТ 26790-85 Техника течеискания. Термины и определения [Electronic resource]. URL: <http://vsegost.com/Catalog/20/20042.shtml> (accessed: 15.11.2021).
15. Поляков Р.К., Кузьминов К.Г., Долгий Н.А. Методика диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения. Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 3. № 4(42). С. 109 – 116
16. Polyakov R.K., Gordeeva E.A. Industrial Enterprises Digital Transformation in the Context / “Industry 4.0” Growth: Integration Features / the Vision Systems for Diagnostics / the Food Packaging Sealing Under the Conditions / a Production Line под ред. S. Ashmarina, A. Mesquita, M. Vochozka, Cham: Springer International Publishing, 2020. 590–608 с.
17. Поляков Р.К., Кузьминов К.Г., Тристанов А.Б. Выбор архитектуры семантической сегментации изображений для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения. Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 2. № 4(50). С. 68–72.

References

1. Potapov A. et al. The latest methods of image processing / Ed. AA Potapova // М.: FIZMATLIT. 2008. Vol. 496.
2. Lukanitsa A., Shishkin A. Digital processing of video images-M.: IS-ES Press. 2009.
3. Kozorez D. et al. Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles. Liters, 2018.
4. Redmon J. YOLO: real-time object detection. University of Washington – CSE. 2018.
5. Ren S. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. 2015. Vol. 28. P. 91–99.
6. Ren S. et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. IEEE, 2016. Vol. 39, No. 6. P. 1137–1149.
7. Dai J. et al. R-fcn: Object detection via region-based fully convolutional networks. 2016. P. 379–387.
8. Liu W. et al. Ssd: Single shot multibox detector. Springer, 2016. P. 21–37.
9. Hong S. et al. PVANet: Lightweight deep neural networks for real-time object detection // arXiv preprint arXiv: 1611.08588. 2016.
10. Huang J. et al. Speed / accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. 2017. P. 7310–7311.
11. Szegedy C. et al. Scalable, high-quality object detection // arXiv preprint arXiv: 1412.1441. 2014.
12. Wu B. et al. Squeezedet: Unified, small, low power fully convolutional neural networks for real-time object detection for autonomous driving. 2017. P. 129–137.
13. Encyclopedia-M BS Soviet encyclopedia. 1969–1978 // Т. 1972. Vol. 7. P. 608.
14. GOST 26790-85 Leak detection technique. Terms and definitions [Electronic resource]. URL: <http://vsegost.com/Catalog/20/20042.shtml> (accessed: 11/15/2021).
15. Polyakov R.K., Kuzminov K.G., Dolgiy N.A. A technique for diagnosing the tightness of food packaging in continuous production for a prototype of a self-learning hardware and software complex for technical vision. Marine Intelligent Technologies. 2018. Vol. 3. No. 4 (42). P. 109 - 116
16. Polyakov R.K., Gordeeva E.A. Industrial Enterprises Digital Transformation in the Context / “Industry 4.0” Growth: Integration Features / the Vision Systems for Diagnostics / the Food Packaging Sealing Under the Conditions / a Production Line ed. S. Ashmarina, A. Mesquita, M. Vochozka, Cham: Springer International Publishing, 2020. 590–608 pp.
17. Polyakov R.K., Kuzminov K.G., Tristanov A.B. The choice of the architecture of the semantic segmentation of images for the prototype of the self-learning hardware and software complex of technical vision. Marine Intelligent Technologies. 2020. Vol. 2. No. 4 (50). S. 68–72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руслан Константинович Поляков, кандидат экономических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательской деятельности, Калининградский государственный технический университет 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Ruslan K. Polyakov, PhD (Eng), Associate Professor, the Head of Department of Scientific Research, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 20.10.2021

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 303.725.23

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.016>

Модель неоднородных потоков событий на основе игры в размещение ранговых автоматов

Д.В. Луценко¹, e-mail: lutsenko@bk.ru, А.В. Сапко¹, e-mail: alexeysapko@rambler.ru,
И.Н. Крюков¹, e-mail: kryukov.in@gmail.com

¹Технопарк Калининградского государственного технического университета

Аннотация Моделирование неоднородных потоков событий, обрабатываемых в автоматизированной системе управления, позволяет оценить её потенциальные возможности, дать количественную оценку вероятности возникновения критических ситуаций, в которых невозможно организовать автоматизированное управление. Неоднородность потоков событий рассматривается в трёх аспектах. Во-первых, для обработки событий различных типов операторам автоматизированной системы требуется разное количество ресурсов, прежде всего временных. Во-вторых, потоки событий существенным образом различаются по интенсивности, а выборка значений интенсивностей разных типов событий является негауссовой. В-третьих, между потоками событий наблюдается сложный, трудно формализуемый механизм взаимовлияния. Для комплексного учёта данных аспектов рассматривается модель неоднородных по типам потоков событий, построенная на игре в размещение ранговых автоматов. Предложены два правила разрешения спорных стратегий в игре в размещение: приоритета действия первого и максимального соответствия.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, обработка событий, поток событий, комбинаторный ранговый анализ, ранговая динамика, ранговый автомат.

Model of heterogeneous streams of events built on the game of placing rank automata

Dmitry V. Lutsenko¹, e-mail: lutsenko@bk.ru, Alexey V. Sapko¹, e-mail: alexeysapko@rambler.ru,
Igor N. Kryukov¹, e-mail: kryukov.in@gmail.com

¹Techno park of Kaliningrad state technical university

Abstract. Modeling heterogeneous streams of events processed in automated control system makes it possible to assess its potential capabilities, to quantify the likelihood of critical situations in which it is impossible to organize automated control. The heterogeneity of streams of events is considered in three aspects. First, for processing events of various types, operators of an automated system require a different amount of resources, primarily temporary. Second, the streams of events differ significantly in intensity, and the sample of intensity values for different types of events is non-Gaussian. Thirdly, a complex, difficult to formalize mechanism of mutual influence is observed between the streams of events. For a comprehensive account of these aspects, a model of events heterogeneous by types is considered, built on the game of placing rank automata. Two rules for resolving controversial strategies in the placement game are proposed: the priority of the action of the first and the maximum match.

Key words: automated control system, event processing, event flow, combinatorial rank analysis, rank dynamics, rank automaton

Введение

В автоматизированных системах управления (далее – АСУ) рассматривают следующие фазы: 1) учёт; 2) контроль; 3) нормирование; 4) анализ; 5) прогнозирование; 6) регулирование; 7) организация; 8) планирование [1]. Учёт, являющийся первым в рассматриваемой последовательности, как правило, организован с использованием технологий баз данных и без него в современных условиях автоматизированное управление не представляется возможным. Последние три фазы являются активными и предполагают реализацию в заданном интервале времени управляющих воздействий.

Рассмотрим организационную систему, выполняющую функции сбора, обработки и анализа информации о событиях в зоне ответственности и применяющую для этого штатную АСУ. Зоной ответственности может выступать ограниченная в пространстве территория, акватория, совокупность административно-территориальных образований, территориально-распределённый технологический процесс и т.д. Персонал организационной системы для выполнения задач сбора, обработки, анализа

информации о событиях использует автоматизированные рабочие места (далее – АРМ). События, в соответствии с принятой в предметной области организационной системы классификацией, разделены на типы. Обработку информации о поступившем событии на АРМ выполняет оператор. Данный процесс включает этапы: индикации, фиксации, отнесение к типу в соответствии с заданной классификацией, реагирования, описания на основе заранее predetermined атрибутов, передачу обработанных данных на другие уровни управления. В зависимости от определяемого классификацией типа события, оператору на его обработку требуется различное время. События различных типов для обработки поступают на АРМ операторов с различной и существенно различающейся интенсивностью.

Выполним формализацию. Событие является заявкой, поток событий потоком заявок, АРМ оператора каналом обслуживания, на вход которого поступает неоднородный поток заявок, а организационная система в целом – системой массового обслуживания. В этом контексте поток неоднородных по типам событий есть возмущающее

воздействие со стороны окружающей среды, которое влияет на работу организационной системы.

Требуется оценить показатели, характеризующие потенциальную возможность АСУ по обработке событий с учётом следующих ограничений, предположений, допущений: поступившее в АРМ событие может обрабатываться только на этом АРМ; события, принадлежащие одному типу, образуют простейший поток; интенсивности потоков различных типов различаются существенным образом и представляют собой негауссовую совокупность [2,3]; между наблюдаемыми событиями имеется сложный, трудно формализуемый механизм взаимовлияния; в каждом зафиксированном временном интервале отсутствуют типы событий с одинаковым значением интенсивности. Известна статистика о потоках событий в зоне ответственности, задано расположение АРМ операторов и их схема сопряжения. Задача – разработать имитационную модель неоднородного по типам потока событий, интенсивности которых принадлежат негауссовой совокупности, воспроизводящую событийную картину в зоне ответственности организационной системы.

1. Математическая постановка задачи

Интенсивности потоков различных типов событий, обрабатываемые организационной системой в целом, заданы ранговым распределением [1,2]:

$$\lambda(r) = A \cdot r^{-\beta}, \quad (1)$$

где A, β – параметры распределения; $\lambda(r)$ – интенсивность типа события, занимающего ранг r .



Рис. 1. Ранговое распределение интенсивностей

Интенсивность отдельного i -го типа потока событий распределена по нормальному закону:

$$\lambda_i \sim N(\mu_i, \sigma_i), \quad (2)$$

где μ_i, σ_i – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение.

В соответствии с механизмом взаимовлияния потоки могут иметь различную интенсивность и занимать на распределении $\lambda(r)$ (1) различные ранги. Это явление в комбинаторном ранговом анализе называется ранговой динамикой и формально задаётся дважды стохастической матрицей вида [3,4,5]:

$$P = \| p_{i,j} \|_{i,j=1}^n, \quad (3)$$

где $p_{i,j}$ – вероятность того, что i -й тип события на ранговом распределении займёт ранг, равный j .

Фактически в определённом временном интервале задаётся ранговое распределение $\lambda(r)$ и взаимно однозначное ранговое отображение [5]:

$$\pi: I \rightarrow R, \quad (4)$$

связывающее множество типов событий $I = \{1, n\}$ и множество рангов $R = \{1, n\}$.

Матрица P (2) определяется на основе анализа статистики по событиям:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Pi_t; \quad \Pi_t = \| \pi_{i,j} \|_{i,j=1}^n; \quad \pi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \pi_t(i) = j; \\ 0 & \pi_t(i) \neq j; \end{cases} \quad (5)$$

где Π_t – подстановочная матрица, определённая для рангового отображения π_t ; π_t – ранговое отображение (3) для распределения интенсивностей типов событий $\lambda(r)$ (1) в момент времени t .

Для учёта более полной статистической картины предлагается рассмотреть вероятность размещения типа события в ранге r при условии, если значение его интенсивности принадлежит ранговому интервалу $[\lambda(r), \lambda(r+1))$. На основании приведённого оценим полную вероятность:

$$P_{i\Sigma} = \sum_{r \in R^{(i)}} [p_{i,r} \cdot (F_i(\lambda(r)) - F_i(\lambda(r+1)))] \quad (6)$$

где $F_i(\lambda)$ – функция распределения вероятностей значений интенсивностей i -го типа события; $R^{(i)}$ – множество рангов, предписанных занимать i -му типу события; $p_{i,r}$ – элемент дважды стохастической матрицы P (5).

При условии, что ранговое размещение состоялось и тип события по своему значению оказался в одном из ранговых интервалов, оценим апостериорную вероятность:

$$q_{i,r} = p_{i,r} \cdot (F_i(\lambda(r)) - F_i(\lambda(r+1))) / P_{i\Sigma}. \quad (7)$$

Выполнив расчёты по всем типам событий, получим соответствующую матрицу вероятностей:

$$Q = \| q_{i,r} \|_{i,r=1}^n. \quad (8)$$

Итак, требуется установить, с учётом статистической картины, описывающей взаимовлияние событий различных типов, заданной матрицей Q (8) и распределением $\lambda(r)$ (1), модельное значение интенсивности потока для каждого i -го типа события:

$$\lambda_i^* = \lambda(\pi^*(i)) \quad (9)$$

на основе модельного рангового отображения $\pi^*: I \rightarrow R$.

Предлагается ранговое отображение π^* определять путём моделирования игры в размещении. Для этого тип события представить ранговым автоматом (рис. 2) [6].



Рис. 2. К понятию рангового автомата

2. Игра в размещение ранговых автоматов

Зададим ранговый автомат (рис. 2), определяемый событием i -го типа:

$$a_i = \langle \Pi^+, \Pi^-, T, F(\lambda) \rangle, \quad (10)$$

где Π^+, Π^- – матрицы переходов автомата в ответ на реакцию среды за выполненное им действие; T – таблица, задающая дискретный закон распределения рангов для типа события; $F(\lambda)$ – функция распределения значений интенсивности.

Работа автомата строится следующим образом. В соответствии с текущим состоянием (рис.2), ранговый автомат, выполняя действие, занимает определяемый текущим состоянием ранг; по занятому рангу в таблице T (6) выбирается значение вероятности, с использованием которого разыгрывается моделирующая реакцию среды бернуллиевская случайная величина. В соответствии

с полученной реакцией среды автомат переходит в новое состояние.

Рассматривая всю совокупность типов событий, каждый из которых моделируется отдельным ранговым автоматом, приходим к игре в размещение множества ранговых автоматов $A = \{a_i\}_{i=1}^n$. Однако, при её реализации возможны случаи, когда разные автоматы занимают одинаковые ранги. Это приводит к спорным стратегиям, которые следует разрешать для преобразования сочетания в размещение и получения модельного рангового отображения π^* (5).

Разберём правила разрешения таких стратегий в игре в размещение (рис. 3) на основе приоритета действия первого и максимального соответствия. Игра состоит из партий, каждая партия характеризуется действиями автоматов. Произвольная k -я партия задаётся векторами: $S_k = \|s_i\|_{i=1}^n$ текущего состояния автоматов; $E_k = \|e_i\|_{i=1}^n$ действий, совершаемых автоматами; $Y_k = \|y_i\|_{i=1}^n$ сигналов от среды (0 или 1) в ответ на действия, выполненные автоматами; $Q_k = \|q_i\|_{i=1}^n$ вероятностей получения от среды в ответ на выполненное действие сигнала 1. В начале партии случайным образом формируется очередь из автоматов. Далее каждый извлечённый из очереди автомат взаимодействует со средой и в зависимости от полученного сигнала 1 или 0 переходит в следующее состояние в соответствии с матрицами переходов Π^+ или Π^- (10). Вектор новых состояний автоматов в следующей партии становится текущим и рассмотренные операции повторяются.



Рис. 3 – Обобщённый алгоритм игры в размещение

Разрешение спорной стратегии, на основе правила приоритета действия первого, заключается в следующем: после действия, совершенного извлечённым из очереди автоматом, назначенным текущим, проверяется, не выполнено ли это действие (выбран соответствующий ранг) другим, ранее извлечённым из очереди автоматом. Если нет, то результат действия текущего автомата сохраняется в партии.

Отличительной особенностью правила максимального соответствия, является то, что в случае занятости ранга, в котором пытается разместиться текущий автомат выполняется следующее: а) для конкурирующих автоматов сравниваются значения вероятностей и в партии остаётся результат автомата, выполнившего действие с большей вероятностью получения от среды сигнала 1; б) автомат с меньшим значением вероятности возвращается в конец очереди и пытается разместиться, «пробуя» выполнить все разрешённые для него действия.

Включённые в партию номера автоматов и выполненные ими действия представляются паросочетанием в двудольном ранговом графе $G_r = (UR, E)$, $I \cap R = \emptyset$ [4,5]. Если полученное паросочетание не является полным, то оно достраивается до такового. Так, что в соответствии с достроенным до полного паросочетания, неразмещённым автоматам принудительно назначаются ранги и моделируется их взаимодействие со средой. Таким образом, партия

завершается, когда все автоматы выполнят действия.

После того, как по результатам партии получено ранговое отображение π^* по (5) для каждого типа события определяется модельное значение интенсивности λ_j^* . Далее, задавшись временем моделирования T^* , для каждого типа события моделируется поток соответствующих событий.

В соответствии с установленной в АСУ схемой сопряжения потоки событий перераспределяются между АРМ операторов. По результатам моделирования процесса обработки событий в каждом АРМ можно оценить, как классические для систем массового обслуживания показатели (длина очереди, время ожидания и т.д.), так и распределение загрузки каналов обслуживания, вероятности возникновения критических ситуаций, а также их длительности.

Заключение

Таким образом, рассмотренный в статье подход по моделированию совокупности неоднородных по типам потоков событий позволяет учесть следующие особенности: негауссовость наблюдаемых потоков по значению их интенсивности путём применения рангового распределения; сложный и трудно формализуемый механизм взаимовлияния потоков событий различных типов за счёт использования комбинаторного рангового анализа и применения игры в размещение ранговых автоматов.

Литература

1. В.Ф. Пономарёв, А.В. Колесников и [др.] Автоматизированные системы управления предприятиями рыбного хозяйства – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 232 с.
2. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: Издательство ТГУ, 1993. 552 с.
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Компьютерная версия пер. и доп. М.: Издательство ТГУ – Центр системных исследований, 2005-2021. URL: <http://gnatukvi.ru>
4. Луценко Д.В. Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат]. Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2018]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.
5. Луценко Д.В. (2017) Основы применения комбинаторной теории ранговой динамики в исследовании функционирования припортового регионального электротехнического комплекса. Морские интеллектуальные технологии. 4(38), Т.2. 122-127.
6. Луценко Д.В. (2018) Вероятностно-автоматное моделирование электропотребления припортового регионального электротехнического комплекса. Морские интеллектуальные технологии. 4(42), Т.3. 177-181.

References

1. V.F. Ponomarev, A.V. Kolesnikov i [dr.] Avtomatizirovannye sistemy upravleniya predpriyatijami rybnogo hozjajstva [Automated management systems for fisheries enterprises] – M.: Legkaja i pishevaja promyshlennost', 1982. 232 s.
2. Kudrin B.I. Vvedeniye v tekhnjetiku [Introduction to technetics]. Tomsk: Izdatel'stvo TGU, 1993. 552 s.
3. Gnatyuk V.I. Zakon optimal'nogo postroyeniya tekhnotsenozov [The law of optimal construction of technocenoses]. Komp'yuternaya versiya per. i dop. M.: Izdatel'stvo TGU – Tsentr sistemnykh issledovaniy, 2005-2021. URL: <http://gnatukvi.ru>
4. Lucenko, D.V. Kombinatornaya teoriya rangovogo dinamiki [Combinatorial theory of rank dynamics] [Traktat]. Pervoe izdanie. – Elektronnye tekstovye dannye. – Kaliningrad: [Izd-vo Kaliningradskogo innovacionnogo centra «Tekhnocenz», [2018]. – Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.
5. Lucenko D.V. (2017) Osnovy primenenija kombinatornoj teorii rangovoj dinamiki v issledovanii funkcionirovanija priportovogo regional'nogo jelektrotehnicheskogo kompleksa [Bases of application of the combinatory theory of ranked dynamics in the research of the functioning of the regional electrical engineering complex of marine port]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 4(38), T.2. 122-127.
6. Lucenko D.V. (2018) Veroyatnostno-avtomatnoe modelirovanie jelektropotreblenija priportovogo regional'nogo jelektrotehnicheskogo kompleksa [Probabilistic-automatic modeling electric power consumption of the portal regional electrotechnical complex]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 4(42), T.3. 177-181.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Владимирович Луценко кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник технопарка, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: lutsenko@bk.ru

Dmitry V. Lutsenko, Ph.D. (eng), associate professor, science researcher of techno park, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation e-mail: lutsenko@bk.ru

Алексей Викторович Сапко младший научный сотрудник технопарка, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: alexeysapko@rambler.ru

Alexey V. Sapko, junior researcher of techno park, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation e-mail: alexeysapko@rambler.ru

Игорь Никитович Крюков доктор технических наук, профессор, научный консультант технопарка, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: kryukov.in@gmail.com

Igor N. Kryukov, Dr. Sci. (Eng), professor, scientific consultant of techno park, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: kryukov.in@gmail.com

Поступила в редакцию: 10.10.2021
Принята к публикации: 17.11.2021

УДК 658.382.3

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.017>

Об управлении безопасностью промыслового оборудования и технологий лова на морских рыболовных судах

В.М. Минько¹, e-mail: mcotminko@mail.ru¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация С учетом обстоятельств гибели морских рыболовных судов «Онега» (2020 г.) и «Дальний Восток» (2005 г.) выполнен обобщенный сравнительный анализ установленных нормативных требований к таким судам, включая применяемое промысловое оборудование, механизмы и устройства.

Были изучены восемь отечественных и международных нормативных документов, содержащих отдельные технические требования к проектированию, строительству, наблюдению за постройкой рыболовных судов. Получено, что такого рода требования приводятся в самом общем виде, без какой-либо детализации. Требования из разных документов по одному и тому же параметру сравнивались по полноте и уровню обеспечения безопасности. Исследовано содержание Правил по охране труда при добыче (вылове), переработке водных биоресурсов и производстве отдельных видов продукции из водных биоресурсов, ОСТ 15.217-79 «Система стандартов безопасности труда. Суда промыслового флота. Оборудование промысловое. Требования безопасности», Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства, Международные правила по безопасности рыболовных судов, Технические рекомендации по обеспечению здоровых и безопасных условий труда и обитания на промысловых судах при качке и заливаемости, Правила классификации и постройки малых рыболовных судов Российского морского регистра судоходства, Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов.

Обоснована необходимость включения всего комплекса промыслового оборудования, механизмов, переоборудования морских рыболовных судов под технический контроль Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: морские рыболовные суда, промысловое оборудование и механизмы, конструктивные требования, методы расчёта, контроль Регистра.

On the safety management of fishing equipment and fishing technologies on sea fishing vessels

Victor M. Minko¹, e-mail: mcotminko@mail.ru¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Taking into account the circumstances of the sinking of the sea fishing vessels Onega (2020) and the Far East (2005), a generalized comparative analysis of the established regulatory requirements for such vessels, including the used fishing equipment, mechanisms and devices, was carried out.

Eight national and international regulatory documents were studied, containing separate technical requirements for the design, construction, supervision of the construction of fishing vessels. It was found that such requirements are given in the most general form, without any detail. Requirements from different documents for the same parameter were compared in terms of completeness and level of security. The content of the Rules for labor protection during the extraction (catching), processing of aquatic biological resources and the production of certain types of products from aquatic biological resources, OST 15.217-79 "System of labor safety standards. Fishing fleet vessels. Fishing equipment. Safety Requirements", Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships of the Russian Maritime Register of Shipping, International Rules for the Safety of Fishing Vessels, Technical Recommendations for Ensuring Healthy and Safe Working Conditions and for Ensuring Heaving and Flooding on Fishing Vessels, Rules for the Classification and Construction of Small Fishing Vessels of the Russian Maritime Register of Shipping, Rules for Technical Supervision over the Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships.

The necessity of including the whole complex of fishing equipment, mechanisms, re-equipment of sea fishing vessels under the technical control of the Russian Maritime Register of Shipping has been substantiated.

Key words: sea fishing vessels, fishing equipment and mechanisms, design requirements, calculation methods, control of the Register

Введение

Современное морское рыболовное судно обеспечивается мощными и достаточно сложными промысловыми оборудованием и механизмами. Конструктивные недостатки, различные нарушения в ходе ведения промысла могут создавать угрозы всему судну. Подтверждением этому являют крушения рыболовных судов «Онега» в 2020 г. в Баренцевом море и «Дальний Восток» в Охотском море в 2005 г., произошедшие именно при ведении промысла. Известны и ряд других случаев гибели морских рыболовных судов. Однако технические

требования к конструкции, размещению промыслового оборудования на морских судах носят весьма общий характер, не детализированы, разбросаны по разным нормативным документам, часть которых к тому же не получила одобрения со стороны Российского морского регистра судоходства (далее Регистра). Поэтому промысловое оборудование и механизмы, переоборудование рыболовных судов под другие способы лова рыбы не включены в состав объектов технического наблюдения со стороны Регистра.

В связи с изложенным была поставлена задача по анализу конструктивных, технологических и иных

требований к промысловому оборудованию и технологиям лова, которые приводятся в известных нормативных документах, имеющих отношение к изучаемому вопросу. Получено, что в этих документах с достаточной полнотой содержатся требования к оборудованию и устройствам, имеющимся на любом морском судне – якорное, швартовное, буксирное и др. Однако по отношению к промысловому оборудованию и устройствам, определяющим использование рыболовного судна по основному назначению, а в значительной мере и безопасность судозкипажа, таких требований недостаточно. Отсюда актуальны предложения по дополнению отдельных частей Правил классификации и постройки морских судов соответствующими требованиями (далее Правила Регистра).

1. Задачи исследования

Основная задача исследования состояла в изучении всего комплекса нормативных документов, относящихся к проектированию и постройке морских рыболовных судов, с целью выявления имеющихся специфических требований именно к рыболовному судну, промысловому оборудованию, устройствам и механизмам. Следующая задача с учетом полученных результатов сопоставительного анализа состояла в обосновании и формулировке предложений по совершенствованию этих требований и их возможному включению в Правила Регистра.

2. Методы исследования

В статье использован метод сравнительного анализа содержания действующих нормативно-технических документов [2]-[8], как отечественных, так и международных, направленный на выявление имеющихся в них требований к морскому рыболовному судну, промысловому оборудованию и устройствам. Требования из разных документов сравнивались на предмет их полноты по отношению к обеспечению безопасности работы рыболовного судна.

3. Результаты

3.1. Промысловое оборудование и устройства как одни из факторов, определяющих безопасность работы рыболовного судна

По имеющимся данным флот рыбной промышленности Российской Федерации составляет около 2000 судов, из них средних длиной 42-60 м насчитывается 850 единиц (41,1%), больших длиной более 60 м – 202 единицы (9,8%) [1]. При этом промысловое оборудование и устройства – важнейшая составляющая современного рыболовного судна, определяющая эффективность его использования по назначению. На морских рыболовных судах это оборудование эксплуатируется на открытых палубах в сложных условиях воздействия качки, морской воды, переменного характера нагрузок, которые могут быть заранее определены только с большими погрешностями. Всё это является причиной того, что именно при эксплуатации промыслового оборудования, при работе с орудиями рыболовства (тралы, кошельковые невода, ярусы, крабовые

порядки) происходит наибольшее число несчастных случаев среди членов судозкипажей. Известны и случаи гибели рыболовных судов из-за недостаточного учета всего комплекса условий, которые должны быть приняты во внимание в ходе проектирования промыслового оборудования для целей обеспечения безопасной работы судна. Автору пришлось готовить экспертное заключение в связи с гибелью 28 декабря 2020 г. в Баренцевом море рыболовного судна «Онега». Оно было построено в Норвегии как траулер, но в последующем переоборудовано под ярусный лов. Из 19 членов судозкипажа пропали без вести (утонули) 17 человек.

Важно отметить следующее. Для обеспечения отдачи и выборки яруса (длина более 10 км) в правом борту судна был сделан вырез (лацпорт), в нем был установлен мальгогер, через который и шла отдача и выборка яруса. Закрывать лацпорт можно было только вручную после демонтажа мальгогера.

Исследованием причин гибели судна занимались ряд специалистов, в том числе и из Центрального научно-исследовательского и проектно-конструкторского института морского флота (ЦНИИМФ). И хотя судно находилось в состоянии обледенения, тем не менее специалистами ЦНИИМФ было указано, что оно потерпело крушение по причине поступления больших масс воды внутрь корпуса судна через открытый лацпорт при значительном крене на правый борт. Расчёты показали, что уже при крене 15° без учёта волнения нижняя кромка лацпорта, даже при загрузке выловленной рыбой на 60-70% от допустимой, оказывается в воде. Поскольку ширина судна составляет 7,50 м, то при крене 20° нижняя кромка лацпорта уходит вниз на 1,35 м, а при крене 30° уже на 2,2 м. В материалах расследования гибели судна приведено сообщение о том, что при загрузке судна рыбой через лацпорт до воды можно было достать рукой.

Известна также гибель 2 апреля 2015 г. большого автономного траулера морозильного БАТМ «Дальний Восток». Установлено, что непосредственно перед гибелью судна на промысловую палубу был поднят траловый мешок с уловом порядка 80 т. Это привело к утрате устойчивости и последующему опрокидыванию судна. Из 132 членов судозкипажа погибли 69 человек.

Рассмотренные два случая гибели рыболовных судов напрямую связаны с промысловым оборудованием и технологиями лова. На дату гибели судна «Онега» в отношении обеспечения требований безопасности в морском промысловом судостроении и рыболовстве действовали ряд нормативных документов, результаты сравнительного анализа которых приведены ниже.

3.2. Результаты сравнительного анализа требований безопасности к морским рыболовным судам

1. Правила по охране труда при добыче (вылове), переработке водных биоресурсов и производстве отдельных видов продукции из водных биоресурсов [2]. В этих правилах, содержащих в основном эксплуатационные требования, тем не менее в п. 185 указано: «Стол, с которого

производится вымет яруса, должен быть надежно закреплен на палубе судна... Поверхность стола должна быть гладкой и не иметь щелей. Между столом и фальшбортом не должно быть зазора». Необходимо отметить, что и в ныне действующих правилах, под тем же названием, вступивших в силу с 01.01.2021 г., это требование сохранилось (п. 164). Таким образом, указанные нормативные документы не предусматривают отдачу и выборку яруса через вырез в борту рыболовного судна. Тем не менее судно получило все необходимые разрешения и вышло в море.

В указанных выше правилах имеется и такое указание (п.4): «В случае применения технологического оборудования и выполнения работ, требования к безопасному применению и выполнению которых не предусмотрены правилами, следует руководствоваться требованиями соответствующих нормативных правовых актов, содержащих государственные нормативные требования охраны труда, и требованиями технической (эксплуатационной) документации организации-изготовителя». Однако остается не определенным, к каким же нормативным правовым актам можно обратиться, если применено промышленное оборудование, в отношении требований безопасности к конструкции которого и эксплуатации нет каких-либо сведений. Именно такая ситуация возникла на рыболовном судне-ярусолове «Онега».

2. ОСТ 15.217-79 «Система стандартов безопасности труда. Суда промыслового флота. Оборудование промысловое. Требования безопасности [3]. В п. 1.16 этого стандарта приведено следующее требование: «Все промысловые механизмы и устройства должны надежно работать при длительном крене судна до 15° и дифференте до 5°». Лацпорт – это элемент использовавшийся на судне «Онега» промыслового устройства для работы с ярусом. Требованию надежности он не соответствует, так как при открытой аппарели лацпорта внутрь корпуса судна поступала вода и при кратковременном до 15° из-за волнения, что в конечном итоге при увеличении крена привело к крушению судна. Однако по ОСТ 15.217-79 нет согласования со стороны Российского морского регистра судоходства, поэтому контроль устройства и размещения указанного технического элемента в корпусе (борту) судна, а также ряда других технических требований к промышленному оборудованию и устройствам (слип, ограждения, управление промысловыми механизмами и устройствами, барабаны навивные канатные и сетные, канатоукладчики, приводы, тормоза), не осуществляется.

3. Правила классификации и постройки морских судов (далее Правила). Безусловно, этот документ является важнейшим, определяющим безопасную работу морского судна. Вместе с тем проведенный анализ его содержания показывает [4], что вопросы конструкции, проектирования, компоновки промышленного оборудования на морских рыболовных судах не рассматриваются. Некоторое исключение составляет часть II «Корпус» Правил. В этой части в третьей главе «Требования к конструкциям специализированных судов» рассматриваются и рыболовные суда. Изложены

дополнительные требования по корпусу рыболовного судна, конструкции слипа на судах кормового траления, методика определения расчётных нагрузок на стенки и палубу слипа, требования в отношении подкреплений в районе установки траловых дуг на судах бортового траления. Для этих судов рекомендуется устройство бака. Но слип на кормовых траулерах – это лишь один элемент из состава требуемого промыслового оборудования. Необходимы ещё мощные траловые и вытяжные лебедки, промысловые грузоподъемные устройства и другие виды оборудования.

В части IX «Механизмы» Правил содержатся требования и по палубным механизмам. Однако они относятся к якорному, швартовному и буксирному механизмам. Промысловые механизмы, включая траловые и сейнерные лебедки, траловые (сетные) барабаны, вытяжные лебедки, силовые блоки, другие промысловые механизмы, без которых невозможно использование рыболовного судна по назначению, не рассматриваются. Следовательно, их проектирование, изготовление, размещение на судне осуществляются без согласования и наблюдения со стороны Регистра. А ошибки в проектировании, размещении этих механизмов, недостаточный уровень защиты могут создавать серьезные опасные ситуации для всего рыболовного судна. Это и траулеры, и сейнеры, и ярусоловы.

4. Правила классификации и постройки малых рыболовных судов Российского морского регистра судоходства [5]. Эти правила относятся к судам длиной от 12 до 24 м и мощностью главного двигателя от 55 до 375 кВт. Наблюдению Регистра в процессе постройки этих судов подлежат главные механизмы, рулевое, якорное, швартовное, буксирное устройства, мачты и такелаж, закрытия, аварийное снабжение. Однако палубное промышленное оборудование не указывается.

5. Международные правила по безопасности рыболовных судов [6]. Этот документ содержит десять глав, которые разбиты на отдельные правила (пункты). Большинство глав и правил относятся либо к уже построенному судну и дается содержание его освидетельствования, либо приводится самая общая информация, относящаяся к любому морскому судну. Вместе с тем в главе 3 «Остойчивость и связанные с ней мореходные качества» приведены правила 3,6,12, которые заслуживают отдельных комментариев, так как относятся именно к рыболовным судам. Правило 3 содержит следующие требования: «Угол крена, при котором может произойти прогрессирующее затопление рыбных трюмов через люки, остающиеся открытыми во время промысловых операций и которые не могут быть быстро закрыты, должен быть не менее 20°». Однако выше уже указывалось, что даже при угле 15° создавались опасные условия. Таким образом, уровень требования, содержащегося в правиле 3, является скорее всего недостаточным.

Правило 6 сформулировано в следующем виде: «Суда должны ... выдерживать заливание палубы с учетом сезонных условий погоды, состояния моря, при которых судно будет эксплуатироваться, типа судна и способа его работы». Изложенное правило, конечно, является важным и необходимым, но в рассматриваемом документе отсутствует указание каких-либо технических или управленческих

решений, направленные на его практическое обеспечение.

Важным является и правило 12: «Высота судна в носу должна быть достаточной... чтобы предотвратить чрезмерное заливание палубы». Ясно, что для предотвращения такого заливания должны быть предусмотрены конкретные конструктивные решения на стадии проектирования и строительства судна и на стадии его эксплуатации. Но какие-либо рекомендации по таким решениям не приводятся.

В главу 6 документа «Защита экипажа» включено правило 3 такого содержания: «На кормовом траулере по верхней кромке слипа должны быть предусмотрены надлежащие защитные устройства, такие как двери, ворота или сетки такой же высоты, что и смежный фальшборт или леерное ограждение. Когда такие предохранительные устройства не установлены в рабочем положении, поперек слипа должны быть предусмотрены цепи или другие средства ограждения». В связи с этим правилом 3 уместно привести содержание п.6.2. уже указывавшегося ОСТ 15.217-79 [3]: во-первых, в этом пункте указано, что высота фальшборта со стороны бортов слипа должна быть не менее 1100 мм; во-вторых, со стороны бортов судна на этих фальшбортах по всей длине должны быть установлены штормовые поручни на высоте 900 мм от палубы; в-третьих, со стороны промысловой палубы должно быть установлено устройство закрывания ворот слипа, самозакрывающееся автоматически или закрывающееся при помощи машинного привода с пульта управления сразу же после прохода через эти ворота сетной части орудий лова при его спуске и подъеме. В этом же пункте отмечается: «Применение устройств закрытия ворот слипа типа «гибкий леер» и типа створчатых ворот, закрываемых и открываемых вручную, запрещается». Таким образом, в том что касается конструктивного оформления закрытия ворот слипа на траулерах кормового траления, ОСТ 15.217-79 устанавливает гораздо более жесткие требования безопасности, чем рассмотренные выше Международные правила по безопасности рыболовных судов.

Важно также отметить, что в ОСТ 15.217-79 приведены и ряд других важных конструктивных требований безопасности к промысловому оборудованию морского рыболовного судна: управление промысловыми механизмами и устройствами, конструктивные требования безопасности (раздельно к различным типам рыболовных судов) – траулеры кормового и бортового траления, суда кошелькового лова (сейнеры), барабаны навивные канатные и сетные, канатокладчики и др. Такого детального рассмотрения нет ни в Международных правилах по безопасности рыболовных судов, ни в «Кодексе безопасности рыбаков и рыболовных судов 2005 года».

6. Важным для обеспечения безопасности рыболовных судов являются разработанные в 80-е годы прошлого столетия «Технические рекомендации по обеспечению здоровых и безопасных условий труда и обитания на промысловых судах при качке и заливаемости [7]. В этих рекомендациях для уменьшения заливаемости

промысловых судов приведены формулы для определения высоты надводного борта на верхней палубе у борта, а также высоты защищенного надводного борта на кормовом перпендикуляре при самой большой осадке кормой для судов при наличии слипа и для судов, не имеющих слипа в зависимости от высоты волны трехпроцентной обеспеченности в предполагаемом районе промысла. Таким образом, важная конструктивная характеристика рыболовного судна устанавливается с учетом условий работы судна. Важными являются также критерии качки и установленные для них предельные значения.

7. Промысловая деятельность любого морского рыболовного судна постоянно связана с необходимостью выполнения большого объема различных грузовых операций. Однако «Правила по грузоподъемным устройствам морских судов» [8] не учитывают всех особенностей производства соответствующих работ на рыболовных судах. При подъеме улова на крупнотоннажных траулерах нагрузка на элементы промысловых грузоподъемных устройств может достигать десятков тонн, работы приходится проводить в условиях волнения, при ветре и качке судна, иногда с необходимостью обеспечения спаренной работы судовых стрел. Грузовые устройства используются для спуска орудий лова, для их подъема, для подъема и перемещения тяжелых уловов. То есть, по существу, они являются элементами промыслового оборудования. Важно отметить, что в указанных выше Правилах методы расчета усилий и напряжений в элементах грузоподъемных устройств не регламентируются, однако Регистр может в отдельных случаях потребовать применения одобренных им методов расчета. Это требование в особенности актуально для крупнотоннажных рыболовных судов, так как в качестве расчетных нагрузок следует принимать не только вес поднимаемого груза (улова), но и дополнительные нагрузки, создаваемые самим орудием лова.

8. Степень соблюдения установленных требований правил Регистра определяется в ходе технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. В соответствующих правилах осуществления технического наблюдения [9] указано, что объектами наблюдения могут быть технологические процессы, как типовые, по которым уже имеются соответствующие требования, так и новые, требования к которым должны быть одобрены Регистром для применения по назначению. Объектом наблюдения может быть и переоборудование судна существующего характера, то есть такое, при котором изменяются основные характеристики судна – вместимость, габариты, надводный борт, грузоподъемность. Но переоборудование рыболовного судна «Онега» с траулера под ярусолов, не повлекло изменений основных характеристик, тем не менее после этого переоборудования судно потерпело крушение с последовавшей гибелью почти всего судозипажа.

В приложении 1 рассматриваемых Правил приведена номенклатура объектов технического наблюдения Регистра – это изделия, технологические процессы, материалы, программное обеспечение. Под наблюдение

попадают рулевое, якорное, швартовное, буксирное устройства, мачты, оборудование для перевозки грузов, двигатели внутреннего сгорания, турбины, передачи, муфты, компрессоры, шпильки лебедки швартовные, буксирные, шлюпочные. Вместе с тем лебедки траловые, вытяжные, сейнерные, силовые блоки, другие промысловые механизмы и оборудование не перечисляются. Под наблюдение также попадают различные системы дистанционного автоматизированного управления, но система автоматического закрытия ворот слипа на траулерах кормового траления в соответствующий перечень не включена.

Из изложенного следует, что в объем технического наблюдения Регистра за постройкой морских рыболовных судов не входят отдельные механизмы и системы, имеющие важное значение для обеспечения безопасности работы этих судов. Важно обратить внимание также на то, что Регистр оставляет за собой право проверки выполнения конструкторских, технологических и производственных нормативов, не регламентированных правилами, но влияющих на выполнение требований правил Регистра. Промысловое оборудование, соответствующие механизмы и системы, технологии лова могут существенно влиять на выполнение этих требований в том, что касается корпуса, остойчивости, ускорений судна при качке, возникновения повышенного профессионального риска прежде всего на открытых рабочих палубах.

Выводы

1. Из результатов сравнительного обобщенного анализа требований безопасности к рыболовным судам, промысловому оборудованию и устройствам следует, что эти требования изложены в разных документах, конкретные их значения существенно различаются или отсутствуют.

2. Подавляющее большинство указанных требований, методики расчета изложены в документах, по которым нет одобрения Регистра для применения по назначению и соответственно они не являются объектами ехнического наблюдения со стороны Регистра. Вместе с тем имеются данные, что вероятность аварий рыболовных судов с гибелью людей составляет 0,093, и это в 2,16 раза выше, чем для грузовых судов [10]. В 2018 г. По данным Ространснадзора на судах рыбопромыслового флота России произошло 20 таких аварий, в которых погибли 34 человека и 5 получили тяжелые травмы.

3. С учетом того, что Россия возобновила постройку морских рыболовных судов (в основном для Дальнего Востока и Северного бассейна) целесообразно после соответствующей актуализации разработать предложения по дополнению отдельных частей Правил классификации и постройки морских судов требованиями к промысловому оборудованию, механизмам и устройствам, либо подготовить специальный отдельный документ с последующим представлением Регистру. При этом могут быть использованы и те отдельные положения, которые приведены в статье.

Литература

1. Васильев А.М. Задача флота – добывать, берега – перерабатывать. – Рыбное хозяйств. – 2011. - №4. – с. 21-24.
2. Правила по охране труда при добыче (вылове), переработке водных биоресурсов и производстве отдельных видов продукции из водных биоресурсов. Утв. приказом Минтруда России от 02.11.2016 г. № 604н.
3. ОСТ 15.217-79. Система стандартов безопасности труда. Суда промыслового флота. Оборудование промысловое. Требования безопасности.
4. Правила классификации и постройки морских судов.: СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2020 г. Вступили в силу 01.01.2020 г.
5. Правила классификации и постройки малых рыболовных судов: СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2021. – 212 с.
6. Международные правила по безопасности рыболовных судов. Сводный текст правил, приложенных к Торремолиносскому протоколу 1993 г. к Торремолиносской международной конвенции по безопасности рыболовных судов 1977г., измененных Кейптаунским соглашением 2012 г., об осуществлении положений Торремолиносского протокола 1993 г., к Торремолиносской международной конвенции по безопасности рыболовных судов 1977 г.
7. Технические рекомендации по обеспечению здоровых и безопасных условий труда и обитания на промысловых судах при качке и заливаемости. Утв. и введены в действие 19.02.88. – М.: Минрыбхоз СССР, 1988. – 28 с.
8. Правила по грузоподъемным устройствам морских судов. Вступили в силу 01.01.2020 г. Российский морской регистр судоходства, 2020 г.
9. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Вступили в силу 01.01.2020 г. Российский морской регистр судоходства, 2020 г.
10. Минько В.М. Морское рыболовство и безопасность. – Рыбное хозяйство. – 2020. - №6. – с. 111-113.

References

1. Vasil'ev A.M. Zadacha flota – dobyvat', berega – pererabatyvat' [The task of the fleet – is to extract, the coast – is to process]. – Rybnoe khozyaystvo. – 2011. - №4. – s. 21-24.
2. Pravila po okhrane truda pri dobyche (vylove), pererabotke vodnykh bioresursov i proizvodstve otdel'nykh vidov produktsii iz vodnykh bioresursov [Rules for labor protection during the extraction (catch), processing of aquatic biological resources and the production of certain types of products from aquatic biological resources]. Utv. prikazom Mintruda Rossii ot 02.11.2016 g. № 604n.

3. OST 15.217-79. Sistema standartov bezopasnosti truda. Suda promyslovogo flota. Oborudovanie promyslovoe. Trebovaniya bezopasnosti. [OST 15.217-79. Occupational safety standards system. Fishing fleet vessels. Fishing equipment. Safety requirements.]
4. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships].: SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. – 2020 g. Vstupili v silu 01.01.2020 g.
5. Pravila klassifikatsii i postroyki malyykh rybolovnykh sudov [Rules for the Classification and Construction of Small Fishing Vessels]: SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. – 2021. – 212 s.
6. Mezhdunarodnye pravila po bezopasnosti rybolovnykh sudov [International regulations for the safety of fishing vessels]. Svodnyy tekst pravil, prilozhennykh k Torremolinosskomu protokolu 1993 g. k Torremolinosskoy mezhdunarodnoy konventsii po bezopasnosti rybolovnykh sudov 1977g., izlozhennykh Keyptaunskim soglasheniem 2012 g., ob osushchestvlenii polozheniy Torremolinosskogo protokola 1993 g., k Torremolinosskoy mezhdunarodnoy konventsii po bezopasnosti rybolovnykh sudov 1977 g.
7. Tekhnicheskie rekomendatsii po obespecheniyu zdorovykh i bezopasnykh usloviy truda i obitaniya na promyslovykh sudakh pri kachke i zalivaemosti [Technical recommendations for ensuring healthy and safe working and living conditions on fishing vessels during pitching and flooding]. Utv. i vvedeny v deystvie 19.02.88. – M.: Minrybkhov SSSR, 1988. – 28 s.
8. Pravila po gruzopod"emnym ustroystvam morskikh sudov [Rules for the cargou hanging gear of sea-going ships]. Vstupili v silu 01.01.2020 g. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2020 g.
9. Pravila tekhnicheskogo nablyudeniya za postroykoy sudov i izgotovleniem materialov i izdeliy dlya sudov [Rules for technical supervision of the construction of ships and the manufacture of materials and products for ships]. Vstupili v silu 01.01.2020 g. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2020 g.
10. Min'ko V.M. Morskoe rybolovstvo i bezopasnost' [Marine fisheries and safety]. – Rybnoe khozyaystvo. – 2020. - №6. – s. 111-113.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Михайлович Минько, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, ул. Мира пр-т, 2, e-mail: mcotminko@mail.ru

Victor M. Minko, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of technosphere safety, Kaliningrad state technical University, Mira ave., 2, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: mcotminko@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2021
Принята к публикации: 29.10.2021

УДК 330.3+377.022

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.018>

Концепция экосистемы рыбохозяйственного комплекса России

А.Я. Яфасов¹, e-mail: yafasov@list.ru, Ф.Г. Майтаков¹, e-mail: maitakov@mail.ru,
Л.В. Костенко¹, e-mail: kostenko_l_v@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Целью работы является концептуальное представление развития рыбохозяйственного комплекса (РХК) России в цифровой экономике в соответствии с Национальными целями и Национальной технологической инициативой-2035. Предложен новый подход в виде «Стратегии смежного сегмента» к формированию цифровой экосистемы РХК России. В качестве смежных сегментов предлагается включить в экосистему РХК предприятия и организации сельского хозяйства и пищевой промышленности с использованием единой цифровой платформы. В качестве подсистем РХК выделены две группы: структурные подразделения и региональные системы. Сформулированы ключевые факторы, определяющие трансформацию экономики РХК в биоэкономику полного цикла и основные направления развития инноваций. На примере Калининградской области предложена блок-схема цифровой системы РХК региона с включением в неё бизнес-структур, занимающихся переработкой биоресурсов. Показана необходимость организации опережающего развития науки и образования, синхронизации процессов модернизации и цифровизации для обеспечения трансформации экономики РХК в биоэкономику полного цикла. Предложенная концепция экосистемы РХК способствует устойчивому развитию регионов, решению стратегических задач сохранения местной природной среды.

Ключевые слова: цифровые экосистемы, биоресурсы, биотехнологии, модернизация, биоэкономика полного цикла

The concept of the ecosystem of the russian fisheries complex

Abdurashid Ya. Yafasov¹, e-mail: yafasov@list.ru, Fedor G. Maitakov¹, e-mail: maitakov@mail.ru,
Ludmila V. Kostenko¹, e-mail: kostenko_l_v@mail.ru

¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. The aim of the work is a conceptual representation of the development of the fishery complex (FC) of Russia in the digital economy in accordance with the National Goals and the National Technological Initiative-2035. A new approach is proposed in the form of a "Strategy of an adjacent segment" to the formation of a digital eco-system of the Russian agricultural complex. As related segments, it is proposed to include enterprises and organizations of agriculture and food industry in the FC ecosystem using a single digital platform. Two groups are distinguished as subsystems of the FC: structural divisions and regional systems. The key factors that determine the transformation of the economy of the FC into a full cycle bioeconomy and the main directions of the development of innovations are formulated. On the example of the Kaliningrad region, a block diagram of the digital system of the regional agricultural complex with the inclusion of business structures engaged in the processing of bio-resources is proposed. The necessity of organizing the advanced development of science and education, synchronizing the processes of modernization and digitalization to ensure the transformation of the economy of the FC into a full cycle bioeconomy is shown. The proposed concept of the FC ecosystem contributes to the sustainable development of regions, the solution of strategic tasks of preserving the local natural environment.

Key words: digital ecosystems, bioresources, biotechnology, modernization, full cycle bioeconomy

Введение

Целью работы является разработка основных положений концепции развития рыбохозяйственного комплекса (Концепция РХК) России в цифровой экономике в направлении реализации Национальной технологической инициативы-2035 (НТИ-2035). В качестве ключевых факторов, определяющих Концепцию РХК, выделены единая цифровая экосистема РХК, устойчивое развитие, географическое и геополитическое положение региона, глубокая синхронная модернизация и цифровизация РХК, согласованность с положениями Указа Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 года №474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», Доктрины продовольственной безопасности, Стратегий национальной безопасности Российской Федерации, развития морской деятельности и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года [1-4], соответствие Концепции РХК НТИ-2035 на рынках MariNet, FoodNet и EduNet.

Цифровая экосистема РХК представлена в виде двух групп подсистем: структурных подразделений и региональных систем. В данной работе на примере Калининградской области рассмотрены региональные системы РХК. Ранее в работах [5,6] авторами была показана сырьевая ориентированность рыбной отрасли России, возникшая в 90-х гг прошлого века в связи с развалом СССР, проведенной непродуманной приватизацией рыболовных судов, береговых сооружений и предприятий, включая предприятия по переработке рыбной продукции. В результате рыбаки Калининградской области, добывавшие в 70-х гг прошлого века до миллиона и более тонн рыбы в год, за прошедшие десятилетия в 4 раза снизили добычу, рыболовные суда ветшали, атлантический промысел свелся практически к нулю, а аквакультура так и не смогла занять достойное место в экономике Калининградской области, хотя предпосылки для этого имелись. Недостаток добычи водных биологических ресурсов (ВБР), отсутствие атлантического промысла Калининградский РХК восполняет за счет завоза сырья из других регионов

страны, успешно модернизируя рыбоперерабатывающие мощности, расширяя переработку и переходя к цифровым технологиям и рециклингу [7,17].

1. Рыбохозяйственный комплекс Российской Федерации по состоянию на 2021 год

РХК Российской Федерации, оформленный в виде Федерального агентства по рыболовству [8] (ФАР), является подведомственной организацией министерства сельского хозяйства России, которое осуществляет координацию и контроль деятельности ФАР.

РХК представляет собой многофункциональную организационную структуру, включающую учреждение по рыбохозяйственной экспертизе и нормативам, по сохранению, воспроизводству ВБР и акклиматизации, предприятие «Нацрыбресурсы», научно-исследовательские организации, университетские комплексы, учреждения по сохранению водных ресурсов, экспедиционные отряды аварийно-спасательных работ, территориальные управления и ряд других подведомственных учреждений, организаций и предприятий. Укрупненная структура РХК России представлена на рисунках 1 и 2.

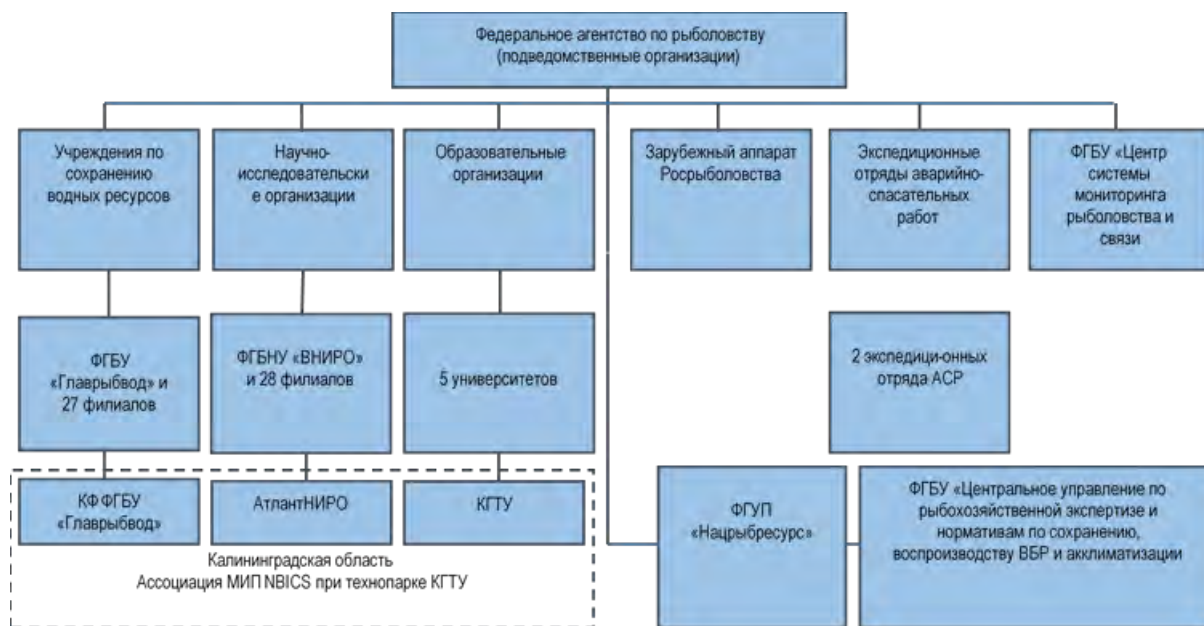


Рис.1. Подведомственные организации Федерального агентства по рыболовству

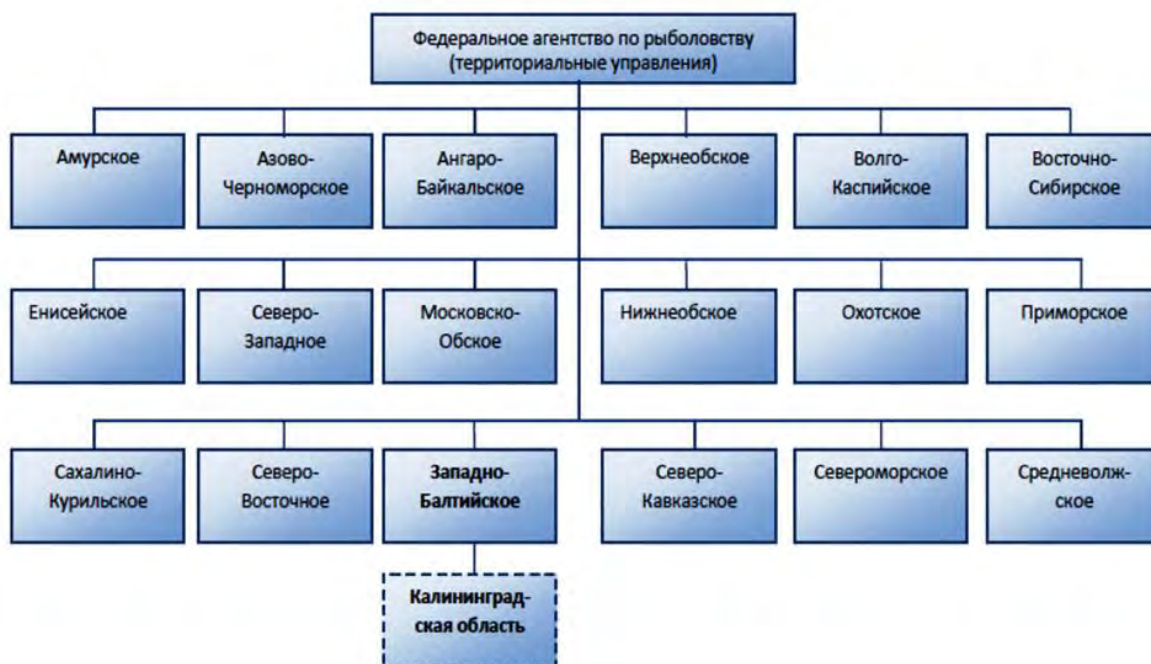


Рис.2. Территориальные управления Федерального агентства по рыболовству

Исходя из Положения о ФАР – РХК России, основные его функции можно сформулировать следующим образом [9,10]:

1) государственный контроль в области рыболовства и сохранения ВБР во внутренних водах России;

2) государственный надзор за торговым мореплаванием в части обеспечения безопасности плавания судов рыбопромыслового флота в районах промысла при осуществлении рыболовства;

3) управление государственным имуществом в рыбохозяйственном комплексе;

4) оказание государственных услуг в области исследования, мониторинга, воспроизводства и рационального использования ВБР и среды их обитания;

5) производство продуктов питания и другой продукции из ВБР;

6) организация профессионального обучения и повышения квалификации специалистов для рыбного хозяйства в соответствии с международными и российскими требованиями;

7) обеспечение безопасности плавания судов рыбопромыслового флота и аварийно-спасательных работ в районах промысла при осуществлении рыболовства;

8) обеспечение безопасности производственной деятельности на судах рыбопромыслового флота и в морских портах в отношении морских терминалов, предназначенных для комплексного обслуживания судов рыбопромыслового флота.

Ряд функций связаны непосредственно с организацией переработки ВБР, в которой лидирующая роль принадлежит науке, инновациям и опережающему профессиональному образованию.

В данной работе рассмотрена 1-ая часть Концепции РХК России - региональная её компонента, так как основные процессы трансформации РХК в концепте цифровой биоэкономики полного цикла, связанном с переработкой продукции, происходят в регионах. Стратегия смежного сегмента [16] к формированию региональных подсистем цифровой экосистемы РХК России открывает новые возможности для региональных предприятий и организаций рыбной отрасли, сельского хозяйства и пищевой промышленности.

Система управления подведомственными организациями ФАР, алгоритмы взаимодействия их между собой, зарубежными компаниями и международными организациями будут рассмотрены во второй части статьи.

Формирование региональной экосистемы РХК рассматривается на примере Калининградской области в части производства продукции из ВБР и организации связанного с ним профессионального обучения и повышения квалификации специалистов для РХК и смежных отраслей экономики. Такой выбор обусловлен несколькими основными причинами: 1) сложившейся за последние 30 лет сырьевой ориентированностью РХК, отсутствием значимых новых высокотехнологичных производств, обеспечивающих глубокую переработку ВБР, включая рециклинг; 2) недостаточной готовностью рыбной отрасли к цифровизации и переходу к цифровой биоэкономике полного цикла; 3) имеющейся наработкой в области цифровых

технологий, цифровых платформ и ситуационных центров в Калининградской области; 4) успешно развивающейся и расширяющейся переработкой ВБР в регионе; 5) перспективами реализации стратегии развития РХК с участием смежных секторов (отраслей) экономики.

Кроме того, следует отметить, Калининградская область входит в лидеры по стране по развитию транспортной и общей инфраструктуры, в первую тройку лучших регионов России по развитию малого предпринимательства, в котором заняты 24% работающего в частном секторе населения [22]. По России в среднем эта цифра составляет по состоянию на ноябрь 2021 года 11,5%. Таким образом, Калининградский региональный бизнес более готов к сетевому взаимодействию.

Опережающее более чем вдвое развитие малого предпринимательства в Калининградской области по сравнению с другими регионами России создает предпосылки успешной реализации стратегии смежного сегмента в перестройке регионального РХК в направлении цифровой биоэкономики полного цикла. Однако, следует отметить и общие положительные тенденции развития предпринимательства, несмотря на известные ограничения, вызванные пандемией COVID-19. По данным Росстата оборот малых предприятий в Российской Федерации в первом полугодии 2021 г. составил 13,7 трлн руб., на 18% превысив показатель того же периода за прошлый год, и, что важно, на 10% превысив показатель первого полугодия 2019 года, не омраченного пандемией

2. Производственная структура и финансово-экономические показатели РХК Калининградской области

По состоянию на 2019 год (год выбран в целях исключения влияния пандемии COVID-19 на сложившиеся тенденции развития различных сфер рыбной отрасли) РХК Калининградской области включал в себя несколько десятков крупных и мелких рыбодобывающих компаний, ИП и самозанятых, свыше 60 хозяйств, занимающихся рыбопереработкой и 5 хозяйств, занимающихся разведением рыбы различной породы. На рисунке 3 представлены наиболее крупные и значимые в масштабах регионального РХК: 6 рыбодобывающих компаний, 14 компаний, занятых переработкой рыбы и все 5 хозяйств, развивающих аквакультуру.

В целом, за предшествующие пять лет с 2015 по 2019 объем производства рыбы и переработанной и консервированной рыбной продукции в Калининградской области колебался в незначительных пределах и составил в среднегодовом исчислении 360±9 тысяч тонн, из которых 3,2% произвели ИП, 11,0% – микропредприятия, 85,8% – малые и средние предприятия. По данным Росстата за 2020 год объем переработанной и консервированной рыбы, ракообразных и моллюсков составил 339,5 тысячи тонн, 146,6 миллиона условных банок рыбных консервов. Общий объем добычи ВБР за 2020 год рыбодобывающими предприятиями Калининградской области составил 251,9 тысячи тонн. За первый квартал 2021 года объем добычи ВБР составил 55,0 тысяч тонн рыбы, из них 22,2 тысячи тонн пришелся на прибрежный промысел.

Неизменность объемов перерабатываемой продукции ($\pm 2,5\%$) в тоннах при росте выручки свидетельствует о стабильном росте объемов и глубины перерабатываемого производства без ожидаемых существенных перемен в весовом выражении. Следует отметить отличие РХК Калининградской области от других регионов России – он является одной из быстро технологически развивающихся отраслей экономики, о чем свидетельствуют её показатели: за январь – июнь 2021 года объем производства переработанной рыбной продукции, ракообразных и моллюсков с учетом привозного сырья составил 165,3 тыс. тонн, значительно превышающий добычу ВБР местными рыбаками – 119,51 тыс. тонн.

Динамика развития быстро развивающихся рыбоперерабатывающих компаний Калининградской области – ООО «Вичюняй-Русь» и ООО «РК «За

Родину» на рисунках 4 и 5. Ряд предприятий РХК, пищевой промышленности и логистики представлены на рисунке 6.

Из всех рыбоперерабатывающих предприятий следует отметить ООО «Вичюняй-Русь», г. Советск, занимающее 15 место среди предприятий Калининградской области по выручке и первое место в категории «Рыба, рыбные продукты, консервы рыбные, морепродукты». На предприятии работает около 1500 человек. За последние 5 лет предприятие удвоило объемы переработки, обеспечив среднегодовой прирост доходов на 15,1 процента [12], ассортимент продукции насчитывает свыше тысячи наименований, в т.ч., крабовые палочки, крабовое мясо, крабовые клешни, крабовый рулет, креветки сурими и другие высококачественные продукты из ВБР. Доходы за 2020 год составили 14,2 млрд руб., прибыль 726,2 млн руб.

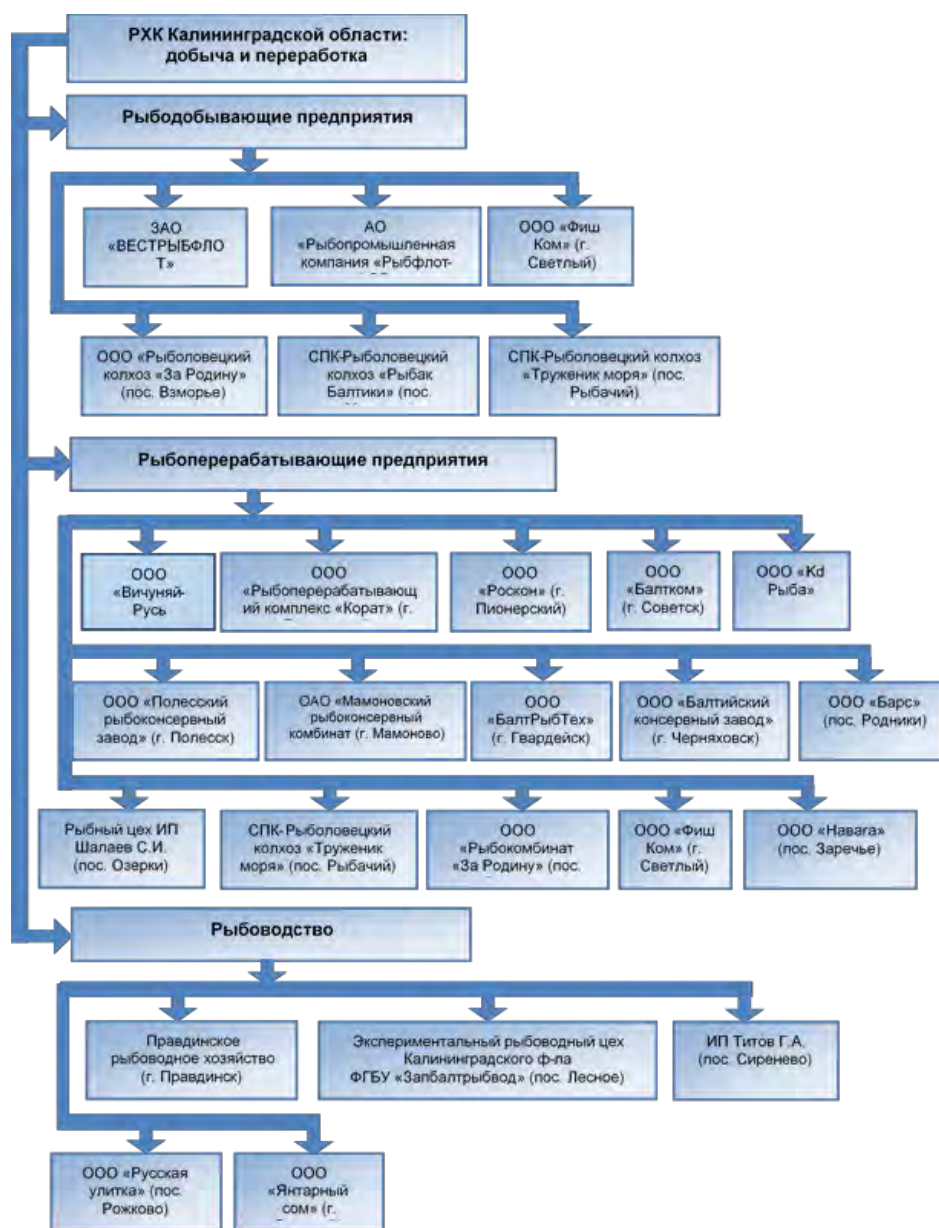


Рис. 3. Рыбодобывающие и перерабатывающие предприятия РХК Калининградской области



Рис.4. Рост выручки компании ООО "ПК "За Родину" с 2011 по 2020 гг, млрд руб

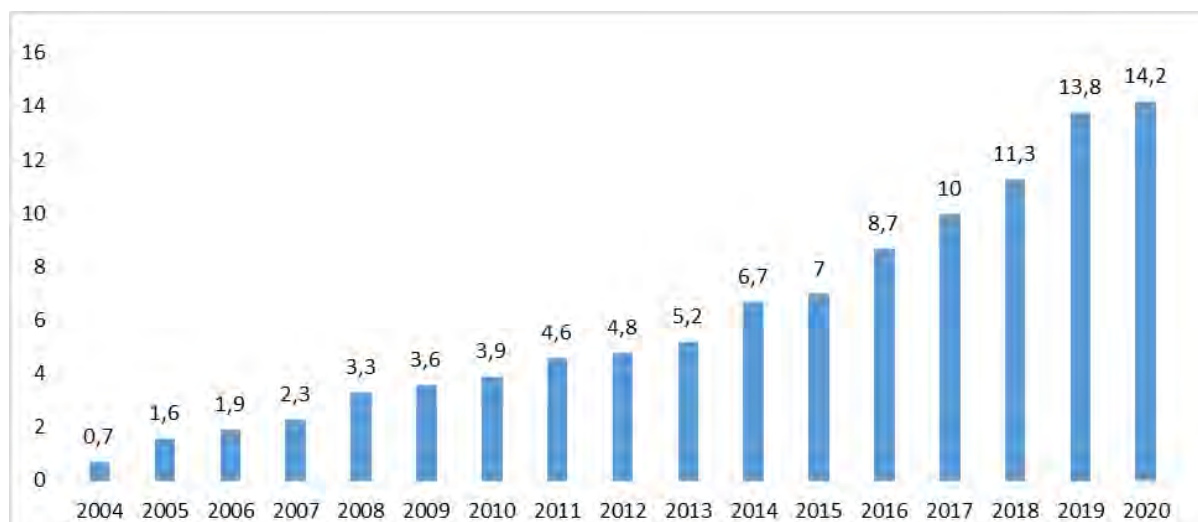


Рис.5. Рост выручки компании ООО «Вичюный-Русь» с 2004 по 2020 гг, млрд руб.

Группа компаний «За Родину», г. Светлый – Взморье осуществляет полный цикл производства: от организации рыболовства, транспортировки, хранения, переработки и до реализации готовой продукции в торговых точках собственной фирменной торговой сети и через крупнейшие региональные торговые сети: «SPAR», «Семья», «Виктория» и др. Развитая логистика позволяет ей обеспечить своей продукцией всю территорию Калининградской области по социальным ценам. Она выпускает сегодня св. 50 наименований рыбных консервов и более 200 наименований пресервов, вяленой и копченой продукции [13]. За последние 5 лет с 2016 по 2020 гг предприятие обеспечивает среднегодовой рост доходов на 18 процентов. Доходы за 2020 год составили 2,731 млрд руб., чистая прибыль 192,9 млн руб. С вводом в строй

нового рыбоперерабатывающего завода ГК «За Родину» планирует удвоить производство шпрот.

Так как вся технологическая цепочка сконцентрирована в одной группе компаний, от вылова рыбы до изготовления продукции и поставки её в торговые сети проходит минимум времени, что обеспечивает высокие стандарты качества поставляемой потребителям продукции. ГК «За Родину» отличается постоянной модернизацией и цифровизацией своего производства, обновлением специального оборудования, внедрением автоматизированных систем контроля производственных процессов, в частности, систем технического зрения на конвейере для контроля качества выпускаемой продукции. Все это позволяет ей уверенно наращивать объемы производства: в 2019 году на 31%, а в 2020 году на 33% [11, 13].



Рис.6. Доходы предприятий РХК, пищевой промышленности и логистики Калининградской области, млрд руб за 2018 год

3. Новый подход к формированию цифровой экосистемы РХК региона

Условием перехода РХК Российской Федерации в цифровую экономику является решение системных проблем в развитии научного и инновационного потенциала РХК, рыболовного судостроения и судового оборудования, технологий и оборудования глубокой переработки ВБР, повышение качества и доступности профессионального образования, построенного и постоянно обновляемого с учетом достижений науки, техники и технологий. При выполнении этих условий появляется смысл и становится возможным развитие цифрового инжиниринга и цифровизация системы управления РХК.

Успешное выполнение Указа Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030

года» и реализация НТИ-2035 в стратегическом развитии РХК невозможна без структурной его перестройки с вовлечением в этот процесс смежных областей пищевой промышленности и сельского хозяйства и эффективного государственно-частного партнерства. Поэтому формулирование положений концепции опирается на состояние и тенденции развития рынков MariNet, FoodNet и EduNet матрицы НТИ-2035 [14] и стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности [15], которое является основным документом стратегического планирования в области цифровой трансформации экономики России. Ключевые факторы расширенного видения региональной рыбной отрасли в контексте реализации стратегии развития РХК с участием смежных отраслей экономики представлены на рисунке 7.



Рис.7. Блок-схема рыбохозяйственного комплекса Калининградской области в контексте стратегии смежного сегмента

Представленная модель РХК региона включает 6 основных блоков: рыбодобывающие и рыбоперерабатывающие компании, компании, занимающиеся аквакультурой, порты и судоремонтные заводы, предприятия, занимающиеся производством оборудования и орудий лова и научно-инновационно-образовательный комплекс. Они выделены штрих-пунктирным овалом. При использовании стратегии смежного сегмента к ним добавляются сельскохозяйственные производители, предприятия пищевой промышленности, транспорта и логистики. Вместе с перерабатывающими предприятиями РХК они образуют расширенную область переработки и перемещения биоресурсов, выделенную на рисунке 6 пунктирным прямоугольником. Все предприятия и организации, представленные на рисунке 7, организуют единую экосистему РХК региона, структурированную на единой цифровой платформе, в которой важную роль играет цифровой транспортно-логистический комплекс, интегрированный в экосистему. Экосистема РХК региона является подсистемой цифровой экосистемы РХК Российской Федерации.

Таким образом, на примере Калининградской области предлагается новый подход к формированию региональных подсистем цифровой экосистемы РХК с дополнительным включением в них предприятий и организаций сельского хозяйства и пищевой промышленности, транспорта и логистики в концепте развития «Стратегия смежного сегмента».

В литературе под стратегией смежного сегмента принято понимать увеличение продаж товаров и услуг, сопутствующих профильному бизнесу [16]. В предлагаемом варианте речь идет о создании совместных продуктов и услуг с предприятиями и организациями смежных отраслей экономики, создавая единую экосистему и используя единую цифровую платформу. Как правило, при этом возникает синергетический эффект – либо появление новых потребительских свойств у новой продукции и услуг, либо повышение их качества, либо снижение себестоимости. Но, во всех случаях наибольший эффект дает создание новой продукции или услуг [10].

При использовании стратегии смежного сегмента дополнительное ускорение роста финансовых и экономических показателей вызывается пограничным эффектом вовлечения в рыночные процессы смежных сегментов экономики, в данном случае сельского хозяйства и пищевой промышленности и значительной структурно-функциональной перестройкой – оптимизацией работы транспортно-логистического комплекса региона.

В настоящее время реестр предприятий Калининградской области в сфере растениеводства насчитывает 349 предприятий и организаций различных форм, в сфере животноводства 170, реестр иных сельхозпроизводителей – 135, всего 654 предприятий и организаций, занятых производством различной, порой уникальной продукции [17]. Вовлечение их в создание совместной продукции и услуг с предприятиями и организациями РХК региона должно привести к осязаемому синергетическому эффекту, появлению новых ниш на рынке новых

продуктов питания. Здесь можно выделить несколько причин появления синергетического эффекта.

Во-первых, создается новый бизнес, профиль которого определяется направлением деятельности РХК, а именно, глубокой переработкой ВБР (МБР) с использованием новых инновационных технологий и оборудования. Ранее, в работе [10] было показано, что использование информационно-коммуникационных технологий при создании нового бизнеса дает существенно более сильный результат по сравнению с цифровизацией производств, ориентированных на выпуск традиционной продукции.

Во-вторых, появляется возможность реализации биоэкономики полного цикла, в которой формирование единой цифровой экосистемы РХК России является ядром новой экономики России в продовольственном секторе, оказывающем стимулирующее влияние на процесс перехода сельского хозяйства и пищевой промышленности к кастомизированному производству, т.е., с ранней настройкой потребительских свойств продукции под индивидуальные нужды каждого человека.

В-третьих, повышение качества за счет применения МБР, обладающих уникальными свойствами, и расширение ассортимента товаров и услуг с вовлечением в совместное производство предприятий сельского хозяйства и пищевой промышленности позволяет, по сути, создавать новые продуктовые линии, востребованные отдельными группами населения, а в пределе, – с учетом индивидуальных пожеланий каждого клиента.

В-четвертых, появляется очень сильная социальная составляющая процесса диверсификации рыбной отрасли региона: в него вовлекаются множество новых участников рынка рыбной продукции на равных условиях на единой цифровой платформе, образуя высокоорганизованную цифровую экосистему, конкурентоспособную на национальном и международном рынках продуктов питания. Это позволяет закрепить коренное население в местах постоянного проживания, обеспечивая высокие устойчивые доходы и достойную жизнь.

В-пятых, использование концепта биоэкономики полного цикла для комплексной модернизации и цифровизации региональных РХК во взаимодействии с предприятиями и организациями сельского хозяйства и пищевой промышленности в единой цифровой экосистеме способствует решению сложных стратегических задач сохранения местной природной среды и стабилизации климата в глобальных масштабах [18].

Следует отметить, что предлагаемая стратегия формирования региональных экосистем рыбной отрасли России в равной степени учитывает интересы существующего бизнеса, модернизируемых предприятий и инновационного предпринимательства, траектории развития которых в единой экосистеме могут быть разными, но цель одна: выстраивание биоэкономики полного цикла. Она позволяет ускорить переход предприятий и организаций, занимающихся переработкой биоресурсов, к биоэкономике полного цикла. Калининградская область может стать пилотным проектом трансформации регионального РХК в единую цифровую экосистему продуктов питания.

4. Роль науки и образования в формировании цифровой инновационной экосистемы РХК

Устойчивость социально-экономических систем в современном мире определяется, в первую очередь, интеллектуальным капиталом организации в виде профессионально подготовленных кадров, умеющих генерировать новые знания, научно-технологические и технические решения, защищать в установленном порядке результаты интеллектуальной деятельности. Она зависит, кроме того, от степени освоения цифровых технологий, развития искусственного интеллекта, формирования современных физических активов, позволяющих производить конкурентоспособную продукцию и услуги.

Для обеспечения этих условий и формирования цифровой экосистемы РХК регионов необходимо опережающее развитие науки, техники и технологий. В РХК России отсутствует трансформация науки и технологий в ключевой фактор его развития, вследствие чего он не может сегодня отвечать должным образом на возникающие вызовы в мировой экономике и экономике страны. Чтобы быть изобретательным, предпринимателю необходимо поддерживающее сообщество – интеллектуальное, инженерное, социальное, которое не только позволит, но и будет способствовать ему – инноватору рассматривать, принимать и реализовывать новые, порой кажущиеся на первом этапе невозможные или нелепые идеи. В конечном счете, то, что предлагает, делает ученый, инноватор-предприниматель, формирует в готовый для употребления продукт сообщество, и если нет такого сообщества, то его надо создавать и создать. Иначе инноватика в предпринимательстве не состоится.

В периоды смены технологических укладов подготовка кадров не вписывается в обычные рамки традиционного образовательного процесса, возникает необходимость в пересмотре ставших классическими форм образования, поиск инновационных подходов и возможностей в образовании, связанных с тотальной цифровизацией и интеллектуализацией экономики, развитием искусственного интеллекта [19]. Отсюда следует вывод: уровень и качество науки, инноватики и профессионального образования, социальной среды является основой перемен в РХК России.

С учетом роли науки, инноватики и профессионального образования в модернизации РХК, социальной среды основных акторов расширенного видения экосистемы РХК с участием смежных отраслей экономики в ключевые направления экосистемных проектов в РХК, система инноваций будет складываться из следующих направлений:

- инновации в технологии переработки рыбы, (ВБР), сельскохозяйственного сырья, включая биотехнологии продуктов питания и аддитивные технологии с использованием молекулярного биосырья;

- новые продуктовые линии, мультипликационный рост которых обеспечивается стратегией смежного сегмента - совместной работой участников рынков рыбной, пищевой промышленности и сельского хозяйства в создании продуктовых инноваций;

- инновации в организации и управлении новыми цифровыми сетевыми производствами взаимосвязанными с потребительскими сетями и транспортно-логистическими компаниями с использованием обратной связи;

- инновации в сфере подготовки профессиональных кадров новой формации, включая вертикально интегрированную систему подготовки: школа – колледж – институт – непрерывная система профессиональной переподготовки и повышения квалификации;

- инновации в государственном региональном и местном управлении, позволяющие организовать эффективное государственно-частное партнерство и устойчивое развитие инновационного предпринимательства.

Сформулированные ключевые направления экосистемных проектов в региональном РХК позволяют выстроить новую региональную политику в цифровой экономике, обеспечивают глубокую переработку биоресурсов, в предельном случае переходя в биоэкономику полного цикла.

В направлении развития новых продуктовых линий совместным сотрудничеством участников расширенного рынка ВБР, (в первую очередь, МБР), особый интерес в стратегической перспективе представляет развитие производства рыбы и мяса на растительной основе с использованием продуктов переработки ВБР [20]. Следует отметить в этой связи, что по сравнению с разработкой различных технологий производства искусственного мяса, получивших значительное развитие в последние годы, производство искусственных морепродуктов не отличающихся по форме и вкусовым качествам и близких по содержанию к натуральным ВБР пока сравнительно малоизученная область [21]. Для получения полноценных морепродуктов близких по содержанию к натуральным необходимо использовать в качестве исходного сырья МБР. Здесь открываются широкие возможности использования отходов переработки МБР в результате рециклинга в натуральные гели с сохранением природных свойств белков, нутриентов, витаминов и др. полезных веществ с последующим использованием для приготовления блюд с помощью аддитивных технологий.

В этом случае принципиальное отличие производства рыбных филе разных пород рыб от искусственной рыбы, изготавливаемой с использованием генномодифицированных бобовых, состоит в том, филе готовится с помощью 3Д-печати с использованием натуральных гелей, полученных из натуральных продуктов переработки ВБР, обеспечивается диетическое питание для населения. Не менее важно то, что ресурсосберегающие решения в виде рециклинга являются важными элементами доктрины сокращения воздействия продовольственной системы на окружающую среду.

Заключение

В результате исследований развития РХК в цифровой экономике в направлении реализации НТИ-2035 в качестве ключевых факторов выделены:

- единая региональная цифровая экосистема РХК;
- устойчивое развитие;

➤ географическое и геополитическое положение региона;

➤ глубокая синхронная модернизация и цифровизация РХК;

➤ соответствие развития РХК Национальным целям и НТИ-2035 на рынках MariNet, FoodNet и EduNet;

➤ согласованность с положениями Доктрины продовольственной безопасности, Стратегий национальной безопасности Российской Федерации, развития морской деятельности и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года;

➤ определяющая роль науки и образования в формировании цифровой инновационной экосистемы РХК региона и страны в целом.

На примере Калининградской области предложен новый подход в виде «Стратегии смежного сегмента» к формированию региональных подсистем цифровой экосистемы РХК России. В качестве смежных сегментов рассмотрены возможности дополнительного включения в экосистему РХК

предприятий и организаций сельского хозяйства и пищевой промышленности, транспорта и логистики.

Показаны возникающие новые возможности и мультипликативный эффект вклада региональных предприятий и организаций рыбной отрасли, сельского хозяйства и пищевой промышленности в экономическое и социальное развитие регионов, в развитие человеческого капитала и оседлость местного населения. Переход региональных РХК во взаимодействии с предприятиями и организациями сельского хозяйства и пищевой промышленности к биоэкономике полного цикла способствует решению стратегических задач сохранения местной природной среды и стабилизации климата в глобальных масштабах.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «КГТУ», тема 21 «Разработка модели сетевой организации рыбной отрасли региона с использованием цифровой платформы». Работа докладывалась на международной конференции «Инновационное предпринимательство 2021: Цифровая экспансия» 5 октября 2021 г, Калининград.

Литература

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 года №20. Дата обращения 12.11.2021 г. <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/m3e3nT1OeMgKkQMA48rcd9DR9egAeZWT.pdf>
2. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 г. № 400. Дата обращения 12.11.2021 г. <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401325792/#1000>
3. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года. Распоряжение Правительства России от 30 августа 2019 г. № 1930-р
4. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжение Правительства России от 26 ноября 2019 г. № 2798-р.
5. А.Я.Яфасов, А.А.Меркулов, Р.К.Поляков, Ф.Г. Майтаков. Экосистема рыбной отрасли в цифровой экономике. Морские интеллектуальные технологии / № 4 том 2, 2020/№ 4. Стр. 85- 95.
6. А.Я.Яфасов, Н.А.Кострикова. Концептуальные подходы к переходу рыбной отрасли России в цифровую экономику. Морские интеллектуальные технологии / № 1 том 1, 2021/№ 1. Стр. 102-110.
7. Р.К.Поляков, К.Г.Кузьминов, А.Б.Тристанов. Выбор архитектуры семантической сегментации изображений для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения. Морские интеллектуальные технологии / № 4 том 2, 2020/№ 4. Стр. 68-75.
8. Постановление Правительства РФ от 12 июня 2008 г. N 450 "О Министерстве сельского хозяйства Российской Федерации". Дата обращения 12.11.2021 г. <http://base.garant.ru/12160970/>
9. Положение о Федеральном агентстве по рыболовству. Утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 11 июня 2008 г. N 444. <https://fish.gov.ru/about/polozhenie/>
10. А.Я.Яфасов, Ф.Г.Майтаков, Л.В.Костенко. Концепция экосистемы рыбохозяйственного комплекса России: субплатформы и функции. Труды БМФ, конференция «Инновационное предпринимательство - 2021: Цифровая экспансия». КГТУ, 2021 г.
11. Финансовая (бухгалтерская) отчетность по данным ФНС и Росстата <https://www.list-org.com/company/2244571/report>
12. Материалы компания СБИС-Калининград, <https://sbis.ru/contragents/3911008930/391101001>
13. Материалы рыболовной компаний «За Родину» <http://zarodiny.ru/>
14. Матрица НТИ-2035 /matrix_nti_2021.pdf
15. Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности. Утверждено распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 ноября 2021 г. № 3142-р
16. Н. Коул, Э.Юн. Почему игры не помогут Netflix. Harvard Business Review-Россия, 10 ноября 2021 г. <https://hbr-russia.ru/marketing/marketingovaya-strategiya/pochemu-igry-ne-pomogut-netflix/>
17. Социально-экономическое положение в 2020 году: Оперативный доклад/Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Калининградской области.-К.-146 стр.
18. К.Локхед, Н.Коул, Э.Юн. Почему игры не помогут Netflix. Harvard Business Review-Россия, 10 ноября 2021. <https://hbr-russia.ru/marketing/marketingovaya-strategiya/pochemu-igry-ne-pomogut-netflix/>
19. Н.А.Кострикова, Ф.Г.Майтаков, А.Я.Яфасов. Интеллектуальный реинжиниринг морского образования при переходе к цифровой экономике. Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies № 2 том 2, 2019/№2 part 2, 2021, стр.149-154.

20. Maille O'Donnell/ GFI's Symposium Highlights Fermentation's Critical Role in the Alternative Protein Industry/ - October 29, 2020 / <https://www.gfi.org/blog-fermentation-symposium-recap>
21. Яфасов А.Я., Кострикова Н.А. Концептуальные подходы к переходу рыбной отрасли России в цифровую экономику. Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies № 1 том 1, 2021/№1 part 1, 2021, стр.102-110.
22. А.А.Алиханов. Послание областной Думе Калининградской области «Об областном бюджете на 2022 год и на плановый период 2023 и 2024 годов». 11 ноября 2021 года. <https://gov39.ru/poslanie/bg2022/>

References

1. Doktrina prodovol'stvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii [Doctrine of food security of the Russian Federation]. Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 21 yanvarya 2020 goda №20. Data obrash'eniya 12.11.2021 g. <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/m3e3nT1OeMgKkQMA48rcd9DR9egAeZWT.pdf>
2. Strategiya nacional'noy bezopasnosti Rossijskoj Federacii [The national security strategy of the Russian Federation]. Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 2 iyulya 2021 g. № 400. Data obrash'eniya 12.11.2021 g. <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401325792/#1000>
3. Strategiya razvitiya morskoy deyatel'nosti Rossijskoj Federacii do 2030 goda [Strategy for the development of maritime activities of the Russian Federation until 2030]. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossii ot 30 avgusta 2019 g. № 1930-r
4. Strategiya razvitiya rybohozyajstvennogo kompleksa Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda [Strategy for the development of the fishery complex of the Russian Federation for the period up to 2030]. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossii ot 26 noyabrya 2019 g. № 2798-r.
5. Yafasov, A.Ya. Merkulov, A.A. Polyakov, R.K. Majtakov, F.G. Ekosistema rybnoy otrasli v cifrovoy ekonomike [Fish industry ecosystem in the digital economy]. Morskie intellektual'nye tehnologii / № 4 том 2, 2020/№ 4. Str. 85- 95.
6. Yafasov, A.Ya. Kostrikova, N.A. Konceptual'nye podhody k perehodu rybnoj otrasli Rossii v cifrivuyu ekonomiku [Conceptual approaches to the transition of the Russian fishing industry to the digital economy]. Morskie intellektual'nye tehnologii / № 1 том 1, 2021/№ 1. Str. 102-110.
7. Polyakov, R.K. Kuzminov, K.G. Tristanov, A.B. Vybory arhitektury semanticheskoy segmentacii izobrazhenij dlya prototipa samoobuchayash'egosya programmno-apparatnogo kompleksa tehnicheskogo zreniya [The choice of the architecture of semantic image segmentation for the prototype of the self-learning hardware and software complex of technical vision] Morskie intellektual'nye tehnologii / № 4 том 2, 2020/№ 4. Str. 68-75.
8. Postenovlenie Pravitel'stva RF ot 12 iyunya 2008 g. N 450 "O Ministerstve sel'skogo hozyajstva Rossijskoj Federacii" [Resolution of the Government of the Russian Federation of June 12, 2008 N 450 "On the Ministry of Agriculture of the Russian Federation"]. Data obrash'eniya 12.11.2021 g. <http://base.garant.ru/12160970/>
9. Polozhenie o Federal'nom agentstve po rybolovstvu [Regulations on the Federal Agency for Fisheries]. Utverzhdeno Postenovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 11 iyunya 2008 g. N 444. <https://fish.gov.ru/about/polozhenie/>
10. Yafasov, A.Ya. Majtakov, F.G. Kostenko, L.V. Konceptsiya ekosistemy rybohozyajstvennogo kompleksa Rossii: subplatformy i funkcii [The concept of the ecosystem of the fishery complex of Russia: sub-platforms and functions]. Trudy BMF, konferenciya «Innovacionnoe predprinimatel'stvo - 2021: Cifrovaya ekspansiya». KGTU, 2021 g.
11. Finansovaya (buhgalterskaya) otchetnost' po dannym FNS i Rosstata [Financial (accounting) reporting according to the Federal Tax Service and Rosstat] <https://www.list-org.com/company/2244571/report>
12. Materialy kompanii SBIS-Kaliningrad [Materials of the company SBIS-Kaliningrad], <https://sbis.ru/contragents/3911008930/391101001>
13. Materialy rybolovnoy kompanii «Za Rodinu» [Materials of the fishing company "For the Motherland"] <http://zarodiny.ru/>
14. Matrica NTI- 2035 [Matrix STI-2035]/matrix_nti_2021.pdf
15. Strategicheskoe napravlenie v oblasti cifrovoj transformacii obrabatyvayush'ih otraslej promyshlennosti [Strategic direction in the field of digital transformation of manufacturing industries]. Utverzhdeno Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 6 noyabrya 2021 g. № 3142-r
16. N.Koul, A.Un. Pochemu igry ne pomogut Netflix [Why games won't help Netflix]. Harvard Business Review-Rossiya, 10 noyabrya 2021 g. <https://hbr-russia.ru/marketing/marketingovaya-strategiya/pochemu-igry-ne-pomogut-netflix/>
17. Social'no-ekonomicheskoe polozhenie v 2020 godu [Socio-economic situation in 2020]: Operativnyj doklad/Territorial'nyj organ Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki po Kaliningradskoj oblasti.-K.-146 str.
18. UN Climate Change Conference UK 2021. COP26 GOALS <https://ukcop26.org/cop26-goals/>
19. Kostrikova N.A., Majtakov F.G., Yafasov A.Ya. Intellektualny reinginirovaniye morskogo obrazovaniya pri perehode k cifrovoy ekonomike [Intelligent reengineering of maritime education in the transition to the digital economy]. Morskie intellektualnye tehnologii /№2 том 2, 2019/№2. Str.149-154.
20. Maille O'Donnell/ GFI's Symposium Highlights Fermentation's Critical Role in the Alternative Protein Industry/ - October 29, 2020 / <https://www.gfi.org/blog-fermentation-symposium-recap>
21. Yafasov, A.Ya. Kostrikova, N.A. Konceptual'nye podhody k perehodu rybnoj otrasli Rossii v cifrivuyu ekonomiku [Conceptual approaches to the transition of the Russian fishing industry to the digital economy]. Morskie intellektual'nye tehnologii / № 1 том 1, 2021/№ 1. Str. 102-110.
22. А.А.Алиханов. Послание областной Думе Калининградской области «Об областном бюджете на 2022 год и на плановый период 2023 и 2024 годов» [Message to the Regional Duma of the Kaliningrad Region "On the regional budget for 2022 and for the planning period of 2023 and 2024."] <https://gov39.ru/poslanie/bg2022/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Абдурашид Яруллаевич Яфасов, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник управления инновационной деятельности, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия, 236022, Советский проспект, 1, e-mail: yafasov@list.ru, ORCID: 0000-0002-9251-1187

Abdurashid Y. Yafasov, Dr. Sci. (Eng), Senior Researcher, head of Innovations, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovietsky prospect, 236022 Kaliningrad, Russia, 1, e-mail: yafasov@list.ru, ORCID: 0000-0002-9251-1187

Федор Георгиевич Майтаков, ведущий специалист технопарка, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия, 236022, Советский проспект, 1, e-mail: maitakov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9706-390X

Fedor G. Maitakov, leading specialist of the technopark, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovietsky prospect, 236022 Kaliningrad, Russia, 1, e-mail: maitakov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9706-390X

Людмила Викторовна Костенко, ведущий специалист отдела интеллектуальной собственности, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия, 236022, Советский проспект, 1, e-mail: kostenko_l_v@mail.ru

Ludmila V. Kostenko, leading Specialist of the Intellectual Property Department, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovietsky prospect, 236022 Kaliningrad, Russia, 1, e-mail: kostenko_l_v@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021

Принята к публикации: 20.11.2021

Метод оценки экономической доступности рыбных продуктов в контексте обеспечения продовольственной безопасности

А.Г. Мнацакян¹, e-mail: mag@klgtu.ru, А.М. Карлов¹, e-mail: anatolij.karlov@klgtu.ru,
А.Г. Харин¹, e-mail: aleksandr.harin@klgtu.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Продовольственная безопасность помимо прочего означает доступность продуктов питания для всех членов общества. Исходя из этого, одна из задач управления продовольственной безопасностью состоит в обеспечении такого режима функционирования рыночного механизма, при котором достигается баланс между спросом и предложением продовольствия на уровне общественно приемлемых норм его потребления. Целью статьи является совершенствование технологии и инструментов управления продовольственной безопасностью РФ в той их части, которая предназначена для оценки состояния и разработки мероприятий по повышению экономической доступности рыбных товаров. Методология исследования базируется на сочетании теоретических положений концепции благосостояния и микроэкономического анализа. В работе исследуются закономерности спроса на рыбные товары, служащие оценке их доступности с позиции частного и общего благосостояния. Для этого используется модель расчета экономического излишка потребителя, позволяющая в явном виде оценивать экономическую доступность рыбных товаров. На основании полученных результатов предлагаются возможные направления принятия управленческих решений в сфере продовольственной безопасности, нацеленные на повышение доступности рыбных товаров.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, рыбные товары, экономическая доступность, спрос, эластичность, благосостояние, экономический излишек.

Method of assessing the economic availability of fish products to ensure food security

Albert G. Mnatsakanyan¹, e-mail: mag@klgtu.ru, Anatolij M. Karlov¹, e-mail: anatolij.karlov@klgtu.ru,
Alexander G. Kharin¹, e-mail: aleksandr.harin@klgtu.ru

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. Food security means the availability of food for everyone in society, among other things. Therefore, one of the goals of food security management is to ensure the functioning of the market mechanism, when a balance is achieved between the demand and supply of food and a socially acceptable level of its consumption is ensured.. The purpose of the paper is to develop food security management tools in the Russian Federation designed to assess the state and develop recommendations for improving the economic availability of fish products. The research methodology is based on a combination of the concept of welfare and microeconomic analysis, when economic accessibility is characterized by certain market parameters. The paper examines models of demand for fish products, which then serve to assess accessibility from the point of view of private and general welfare using the model of economic surplus. The obtained results allowed us to propose directions for making managerial decisions in the field of food security aimed at increasing the availability of fish products.

Key words: food security, fishery products, affordability, demand, elasticity, welfare, economic surplus.

Введение

Проблема доступа к пище была и остается одним из главных вызовов человечеству в целом и каждому индивидууму в отдельности. Поэтому деятельность, направленная на решение данной проблемы, именуемая как “обеспечение продовольственной безопасности”, неизменно входит в число приоритетов людей и правительств. В современном понимании продовольственная безопасность означает не только наличие продуктов питания, но и их доступность для всех людей в количестве и качестве, достаточных для поддержания активной и здоровой жизни [1]. В силу этого эффективное управление продовольственной безопасностью невозможно без адекватной оценки уровня доступности продовольствия.

Целью статьи является совершенствование технологии и развитие инструментов принятия управленческих решений в сфере обеспечения продовольственной безопасности РФ в их части, предназначенной для оценки экономической доступности рыбных товаров. Исследование основывается на сочетании положений концепции

благосостояния и микроэкономического анализа. В фокусе находятся параметры спроса, служащие индикаторами доступности рыбных товаров. В работе анализируется динамика потребления рыбопродуктов относительно цен на них и доходов домохозяйств. Выявленные закономерности затем используются для оценки доступности этих товаров с позиции частного и общего благосостояния, мерой которого выступает показатель экономического излишка. Результаты исследования позволяют дать ряд рекомендаций для выработки управленческих решений в сфере продовольственной безопасности, направленных на повышение доступности рыбных продуктов.

1. Материалы и методы

Существует немало работ, авторы которых исследуют продовольственную безопасность, опираясь на анализ рыночных закономерностей. Стандартным в этих работах является подход, рассматривающий экономику продовольственной безопасности в целом и ее составляющую – экономическую доступность товаров в частности в

двух основных аспектах – с точки зрения спроса и предложения.

Известно, что потребление продуктов питания сильно зависит от цен на них и от доходов потребителей [2]. Следуя идее А. Маршала, что равновесный спрос X является функцией цены p на продовольствие $X(p)$ и дохода I потребителя $X(I)$ [3], можно установить ряд закономерностей, характеризующих экономическую доступность продуктов питания. Прежде всего, определим вид зависимости $X(I)$ от дохода, используя для этого показатель эластичности

$$E_I(x) = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta I} \cdot \frac{X(I)}{I} = \frac{dX}{dI} \cdot \frac{I}{X}; \quad \frac{dX}{X} = E_I(x) \cdot \frac{dI}{I}$$

С увеличением дохода потребителя доступность продуктов питания для него повышается, то есть производная dX/dI имеет положительное значение, поэтому решение данного уравнения может быть записано в виде

$$\ln \bar{X} = E_I(x) \cdot \ln I; \quad X(I) = I^{E_I(x)} \quad (1)$$

Параметры зависимости продовольственного спроса от дохода часто используются для оценки уровня благосостояния [4].

Другим важным фактором, влияющим на потребление продуктов питания, является цена, с увеличением которой их доступность для потребителя снижается, то есть производная dX/dp имеет отрицательное значение и эластичность спроса от цены $E_p(x) = (dX/dp) \cdot (p/X)$ также отрицательна. Таким образом, данная зависимость может быть записана в виде

$$X(p) = (1/p)^{E_p(x)}; \quad E_p(x) < 0 \quad (2)$$

где $E_p(x)$ – эластичность спроса по цене. При известных значениях X , I и p для эластичностей спроса по доходу и по цене соответственно получим

$$E_I(x) = \frac{\ln X}{\ln I} \quad (3); \quad E_p(x) = \frac{\ln \bar{X}}{\ln(1/p)} \quad (4)$$

Ценовая эластичность спроса на продовольствие зависит от дохода – спрос становится менее чувствительным к цене по мере роста дохода. Данный эффект, в частности, описывается в рамках теории предложенной Дж. Хиксом. В этом случае для определения эластичности спроса по цене используется уравнение Слуцкого [5]

$$E_p^w(x) = E_p(x) + E_I(x) \cdot w \quad (5)$$

где $E_p^w(x)$ – ценовая эластичность спроса по Хиксу; $w = \frac{p \cdot x(p, I)}{I}$ – доля дохода домохозяйства, потраченная на продукты питания; $X(p, I)$ – зависимость спроса от цены и дохода по Хиксу.

При известных значениях $E_p^w(x)$ и цены товара зависимость $X(p, I)$ спроса от цены и дохода по Хиксу может быть определена как

$$X^w(p) = p^{E_p^w(x)}; \quad E_p^w(x) < 0 \quad (6)$$

Выяснение базовых микроэкономических закономерностей спроса позволяет оценить уровень экономической доступности товара. Такую оценку

можно сделать, выявив его экономическую ценность. Фактором, создающим ценность, в данном случае выступает потенциальная выгода потребителя, обусловленная возможностью приобрести товар по цене, ниже той, которая определяется его полезностью. Либо, напротив, издержки при отсутствии такой возможности.

Теоретической основой нашего подхода выступает понятие экономического излишка потребителя, являющегося мерой дополнительной полезности, обусловленной рыночным окружением индивида [6]. Данный показатель интерпретируется как денежная выгода потребителя, способного приобрести товар по цене, меньшей, чем самая высокая цена, которую он готов был бы заплатить [7]. Основным методом измерения этой выгоды – оценка готовности платить, базирующаяся на информации о кривой спроса: если обратная функция спроса $p = f(x)$, то потребительский излишек может быть рассчитан как

$$CS = \int_{x_n}^{x_b} f(x) dx - \bar{p} \cdot \bar{x} \quad (7)$$

где \bar{p} и \bar{x} – средние значения равновесной рыночной цены и объема потребления товара, соответственно, x_n – нижняя граница рационального потребления, после которой питание человека становится несбалансированным, x_b – верхняя граница потребления, которая ограничивается покупательной способностью дохода потребителя.

Поскольку пища является необходимым благом для человека, существует минимальный уровень ее потребления, обеспечивающий выживание индивида. Хотя рыбопродукты – товар, который может быть замещен другими видами продовольствия, тем не менее, учитывая современные взгляды на качество и традиции питания в нашей стране (в т.ч., закрепленные в правительственных документах, например в Доктрине продовольственной безопасности [8]) в отношении минимального уровня потребления можно установить некоторую минимальную норму потребления x_n , после которой питание человека становится несбалансированным и дальнейшая замена рыбопродуктов другими видами пищи создает угрозу здоровью и жизни. Описанный подход к оценке экономической доступности рыбопродуктов может служить инструментальной основой для принятия решений по управлению продовольственной безопасностью.

2. Результаты и обсуждение

В таблице приведен ряд маркеров экономической доступности рыбных товаров, рассчитанных с помощью формул (1)-(7). Для упрощения анализа рыба и рыбопродукты рассматриваются как совокупный товар, а разновременные стоимостные показатели приведены в сопоставимый вид.

Таблица.

Показатели экономической доступности рыбопродуктов в РФ

Наименование показателя	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2010-2019
Среднедушевое потребление (x), кг/чел. в год в товарном весе	14,8	14,8	15,2	15,4	15,3	15,3	14,7	14,8	14,8	15,2	15,0

Среднедушевой денежный доход (I), тыс. руб./чел. в год, в ценах 2010 г.	227,4	226,8	238,5	245,3	239,9	233,0	223,9	225,2	226,1	237,6	232,3
Среднегодовая цена рыбопродуктов (p), руб./кг, в ценах 2010 г.	118,5	118,2	123,8	127,0	124,4	121,1	116,7	117,4	117,8	123,3	120,8
Покупательная способность дохода (I/p), кг/чел. рыбопродуктов в год	1919	1918,5	1926,4	1932,1	1927,9	1923,7	1917,9	1918,7	1919,4	1926,1	1923,2
Средняя доля бюджета домохозяйств на рыбопродукты (w)	0,0077	0,0077	0,0079	0,008	0,0079	0,0078	0,0077	0,0077	0,0077	0,0079	0,0078
Эластичность спроса по доходу ($E_I(x)$)	0,497	0,497	0,497	0,498	0,498	0,498	0,497	0,497	0,497	0,498	0,497
Эластичность спроса по цене ($E_p(x)$)	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565	-0,565
Эффект дохода ($E_I \cdot w$)	0,0038	0,0038	0,0039	0,004	0,0039	0,0039	0,0038	0,0038	0,0038	0,0039	0,0039
Эластичность спроса Хикса по цене (E_p^w)	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,562	-0,561	-0,561

Источник: Росстат [9, 10], расчеты авторов

Соответствие результатов расчетов $E_I(x)$ и $E_p(x)$ оценивалось по величинам среднеквадратического отклонения статистических данных от теоретических значений и коэффициента детерминации. За весь наблюдаемый период среднеквадратическое значение отклонений $\Delta = X - I^{E_I(x)}$ не превышает 0,018, а коэффициент детерминации составляет 0,91. Среднеквадратическое значение отклонений $\Delta = X - (1/p)^{E_p(x)}$ равно 0,014, а коэффициент детерминации – 0,98. Это свидетельствует о хорошем соответствии полученных теоретических зависимостей статистическим данным.

Полученные нами результаты целесообразно сравнить с данными других исследований. Так, согласно данным глобального мониторинга продовольственного рынка, эластичность спроса на продукты питания составляет от 0,56-0,35 в странах с высоким уровнем дохода до 0,85-0,71 в странах с низким уровнем дохода [11]. Исследования параметров агрегированного спроса на рыбопродукты довольно редки (в основном они фокусируются на отдельных видах рыбопродуктов). Тем не менее, имеются данные, что эластичность спроса по доходу на российском рынке рыбопродуктов составляла от 0,45 (в 1990-2008 гг.) [12] до 0,58 (в 2010-2013 гг.) [13].

По нашим оценкам (табл.) эластичность спроса на рыбопродукты по доходу в 2010-2019 гг. была довольно стабильной, с незначительными отклонениями от среднего значения 0,497. Это подтверждает выводы разных авторов, что спрос на рыбопродукты, являющиеся товаром первой необходимости для большинства россиян, слабо зависит от дохода. Дополнительное изучение

эластичности спроса по доходу в группах населения с разным уровнем дохода показало, что наиболее высокая эластичность спроса по доходу имеет место в группе населения с минимальными доходами (0,72 в первой 20-процентной группе) и убывает по мере роста доходов (0,22 в четвертой группе). Нами выявлена положительная корреляция между среднедушевым доходом и среднедушевым потреблением рыбопродуктов в России. Быстрый рост потребления при повышении доходов малоимущих групп населения делает перспективным управление этим фактором в целях повышения продовольственной безопасности. Вместе с тем, по мере роста личных доходов проявляется тенденция насыщения спроса – из-за ограниченной физиологической потребности людей в продуктах питания в целом и в рыбной продукции, в частности. Дальнейшее увеличение дохода не вызывает соответствующего увеличения спроса, и он становится менее эластичным по доходу. Проведенный анализ позволяет сделать предварительный вывод о возможных приоритетах в управлении продовольственной безопасностью – усилия должны быть направлены на достижение экономической доступности рыбопродуктов в низкодходных группах населения.

Хотя в российских условиях эластичность спроса на рыбопродукты по доходу и выглядит наиболее перспективным индикатором управления продовольственной безопасностью, традиционно в рыночной экономике важным является другой показатель – эластичность спроса по цене в двух основных версиях (по Маршаллу и по Хиксу). Судя по результатам исследований, в странах ЕС средняя

величина эластичности потребления рыбопродуктов по цене оценивается в размере -0,31 [14], что соответствует уровню стран с высоким доходом. В России, согласно данным ресурса USDA-ESR database, величина данного показателя в 1995-2003 гг. соответствовала уровню бедных стран: -0,60 [15]. Однако, по мнению некоторых отечественных авторов данный параметр спроса на рыбопродукты в России близок к среднеевропейскому уровню и составляет от -0,36 [12] до -0,30 [13]. Наше исследование показало, что на длительный временном отрезке (2010-2019 гг.) величина показателя ценовой эластичности рыбопродуктов по Маршаллу составляла -0,565, показателя эластичности по Хиксу – -0,561, что соответствует странам с неразвитым рыбным хозяйством и подсказывает в качестве одного из направлений политики в области продовольственной безопасности управление ценовым фактором.

Знание закономерностей спроса на рыбные продукты позволяет количественно оценить величину экономической ценности (выгоды), создаваемой доступностью этих продуктов. Для этого воспользуемся методом вычисления экономического излишка на основе теоретических моделей описывающих спрос рыбопродуктов в России. Обратная зависимость $p = f(x)$ может быть получена из формулы (2) в виде $p = X^{|E_p(x)|}$. Подстановка этой функциональной зависимости в (7) дает общую формулу для расчета величины излишка потребителя рыбной продукции.

$$CS = \frac{|E_p(x)|}{1 + |E_p(x)|} \cdot \left[x_B^{\frac{1+|E_p(x)|}{|E_p(x)|}} - x_H^{\frac{1+|E_p(x)|}{|E_p(x)|}} \right] - \tilde{x} \cdot \tilde{p}$$

С учетом значений \tilde{x} , \tilde{p} и ценовой эластичности спроса по Маршаллу величина излишка среднего потребителя рассчитывается как

$$CS = \frac{1}{2,769} \cdot [x_B^{2,769} - 4,51^{2,769}] - 1815,68$$

Аналогичный расчет излишка потребителя, использующий показатель ценовой эластичности спроса по Хиксу выполняется по формуле

$$CS_w = \frac{1}{2,781} \cdot [x_B^{2,781} - 4,43^{2,781}] - 1782,46$$

В графическом виде зависимости излишка потребителя по Маршаллу (CS) и по Хиксу (CS_w) от значений x_B приведены на рисунке. В расчетах значение нижней границы потребления принято равным $x_H = 0,3\tilde{x}$.

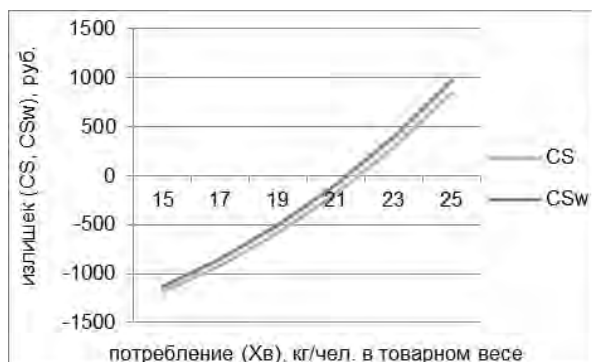


Рис. Излишек потребителя рыбной продукции

Найденные зависимости позволяют сделать ряд выводов о состоянии экономической доступности рыбопродуктов и о способах управления этой важной составляющей продовольственной безопасности. Используя эмпирические зависимости и предварительные данные Росстата о среднедушевом потреблении рыбопродуктов в 2020 г. – 15,5 кг в товарном весе (22,2 кг в живом весе), текущий излишек (потери) потребителя можно оценить в размере 1070-1125 руб. (69-73 руб. на кг потребленной продукции). С позиций продовольственной безопасности полученный результат означает низкую доступность рыбопродуктов для значительной части граждан нашей страны. Согласно нашим расчетам, экономическая доступность рыбопродуктов обеспечивается при среднем уровне потребления не ниже 21,5 кг/чел. в товарном весе. В настоящее время такой уровень в РФ достигнут только в одной, наиболее высокодоходной группе населения. Это подтверждает наши предположения, что одним из действенных способов повышения продовольственной безопасности должны стать прямые или косвенные меры, направленные на рост экономической доступности рыбопродуктов в малообеспеченных группах населения, а также на сдерживание цен на рыбопродукты.

Заключение

Выявленные в работе закономерности могут быть полезны при принятии управленческих решений, поскольку позволяют предсказывать реакцию рынка рыбных продуктов на меры социальной и экономической политики. Понимание и учет таких ключевых параметров как эластичность спроса является необходимой составляющей многих мер по повышению продовольственной безопасности. Основываясь на них, можно определить, на какие группы населения следует ориентироваться при регулировании рынка, осуществлении программ продовольственной помощи населению или поддержки производителей.

Помимо самостоятельного значения, выявленные с помощью микроэкономических метрик эмпирические закономерности спроса, служат основой для моделирования и оценки одного из важных аспектов продовольственной безопасности – выгод и издержек, обусловленных экономической доступностью рыбных продуктов для российских потребителей. Предлагаемый показатель экономической ценности (потребительского излишка) представляющий собой обобщенную характеристику доступности, может служить индикатором для обоснования и контроля выполнения политических решений, в частности, входит в перечень целевых параметров Доктрины продовольственной безопасности РФ и соответствующих государственных программ. Расчеты показывают, что в качестве величины этого показателя может быть принята рекомендованная Минздравом России норма потребления рыбопродуктов в размере 24 кг/чел. в год [16]. Определенными ориентирами доступности также могут служить исторические данные и показатели других стран, имеющих развитое рыбное хозяйство, например, уровень потребления рыбопродуктов в СССР в 1990 г.,

составлявший 20,4 кг/чел. или аналогичный показать в современной КНР – около 25 кг/чел.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать общий вывод, что если рассматривать только экономические меры, то повысить доступность рыбопродуктов можно путем снижения цен или увеличения доходов низкодоходных групп потребителей. Одновременно с этим должны реализовываться меры, направленные на поддержку поставок рыбной продукции на внутренний рынок, стимулирующие предложение. Набор возможных мер государственной политики, способных обеспечить требуемый результат, подробно описан в

работах отечественных авторов. В частности, это могут быть: ограничение торговой наценки и субсидирование поставок продукции на внутренний рынок [17], меры тарифного и нетарифного регулирования экспорта рыбного сырья [18], совершенствование налогового механизма в отрасли [19], адресная поддержка потребителей и др. При этом предложенный нами метод может послужить основой для принятия оптимальных решений, обеспечивающих наилучший результат с точки зрения как укрепления продовольственной безопасности, так и роста общественного благосостояния.

Литература

1. Римская декларация о всемирной продовольственной безопасности. План действий Всемирной встречи на высшем уровне по проблемам продовольствия. Рим, ФАО. 1996.
2. Gao, G. (2012) World food demand. *American Journal of Agricultural Economics*, 4(1), p. 5–51.
3. Deaton, A. (1992) *Understanding Consumption*. Oxford, Clarendon Press. 1992.
4. Chai, A., Moneta, A. (2010) Retrospectives: Engel Curve. *Journal of Economic Perspectives*, 24(1), p. 225–240.
5. Слуцкий Е.Е. К теории сбалансированного бюджета потребителя // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2016. №4. С. 86–111.
6. *Encyclopedia Britannica*. Consumer surplus. – URL: <https://www.britannica.com/topic/consumer-surplus> (дата обращения: 12.09.2021г.)
7. Chavas, J.-P. (2017) On food security and the economic valuation of food. *Food Policy*, 69, p. 58–67.
8. Доктрина продовольственной безопасности России. Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. №20.
9. Российский статистический ежегодник 2020. М., Росстат. 2020. 700 с.
10. Цены в России 2020. М., Росстат. 2020. 147 с.
11. Muhammad, A., Seale, Jr., Meade, B., Regmi, A. (2013) *International Evidence on Food Consumption Patterns: An Update Using 2005 International Comparison Program Data*. TB-1929. Washington, U.S. Dept. of Agriculture, Econ. Res. Serv.
12. Суворов А.В., Соловьев А.М. Прогнозирование структуры расходов населения на товары и услуги // Проблемы прогнозирования. 2011. №1. С. 104–114.
13. Романова Л.В. Особенности формирования спроса на рыбную продукцию в отдельных регионах Центрального федерального округа // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 2-1. С. 197-201.
14. Babovic, J., Ignjatijevic, S., Dordevic, D. (2011) Supply, Demand and Elasticity Of Fish. *Economics of Agriculture*. 2011, 58(4).
15. USDA-ESR database. Demand Elasticities From Literature. – URL: https://data.ers.usda.gov/reports.aspx?ID=17825#P402584b485d84ae1bc7dd957ca1fbc4_4_214 (дата обращения: 10.09.2021г.)
16. Министерство здравоохранения Российской Федерации / Открытые данные. Рациональные нормы потребления пищевых продуктов [Электронный ресурс]. – URL: <https://minzdrav.gov.ru/opendata/7707778246-potrpotrebproduct/visual> (дата обращения: 12.09.2021г.)
17. Синяков С.А. Показатели и тенденции российского рыбного рынка // *Рыбное хозяйство*. 2015. № 6. С. 22–29.
18. Васильев А.М. О строительстве новых траулеров, о производстве рыбопродукции высокой степени обработки и других проблемах в области рыбного хозяйства // *Рыбное хозяйство*. 2016. № 3. С. 9–15.
19. Мнацаканян А.Г., Кузин В.И., Харин А.Г. О некоторых современных тенденциях в развитии российского рыбного хозяйства. Часть 9. Проблемы налогообложения рыбной отрасли // *Балтийский экономический журнал*. 2020. №3(31). С. 57–72.

References

1. FAO (1996) *Rome Declaration on World Food Security*.
2. Gao, G. (2012) World food demand. *American Journal of Agricultural Economics*. 94(1), 25–51.
3. Deaton, A. (1992) *Understanding Consumption*. Clarendon Press, Oxford.
4. Chai, A., Moneta, A. (2010) Retrospectives: Engel Curves. *Journal of Economic Perspectives*. 24(1), 225–240.
5. Slutskiy E.E. (2016) К теории сбалансированного бюджета потребителя [Towards the theory of a balanced consumer budget]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika [Bulletin of Moscow University. Series 6. Economy.]*. 4, 86–111. (in Russ.)
6. *Encyclopedia Britannica*. Consumer surplus. – URL: <https://www.britannica.com/topic/consumer-surplus>
7. Chavas, J.-P. (2017) On food security and the economic valuation of food. *Food Policy*. 69, 58–67.
8. Doktrina prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossii [Food security doctrine of Russia]. Decree of the President of the Russian Federation of January 21, 2020 No. 20. (in Russ.)
9. Rossiyskiy statisticheskiy yezhegodnik 2020 [Russian Statistical Yearbook 2020]. М., Rosstat. 2020. (in Russ.)
10. Tseny v Rossii 2020 [Prices in Russia 2020]. М., Rosstat. (in Russ.)

11. Muhammad, A., Seale, Jr., Meade, B., Regmi, A. (2011) International Evidence on Food Consumption Patterns: An Update Using 2005 International Comparison Program Data. TB-1929. U.S. Dept. of Agriculture, Econ. Res. Serv. Revised February 2013. – URL: https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/47579/7637_tb1929.pdf?v=1816.5
12. Suvorov A.V., Solov'yev A.M. (2011) Prognozirovaniye struktury raskhodov naseleniya na tovary i uslugi [Forecasting the structure of household spending on goods and services]. Problemy prognozirovaniya [Forecasting problems]. 1, 104–114. (in Russ.)
13. Romanova L.V. (2016) Osobennosti formirovaniya sprosa na rybnuyu produktsiyu v otdel'nykh regionakh Tsentral'nogo federal'nogo okruga [Features of the formation of demand for fish products in certain regions of the Central Federal District]. Fundamental'nyye issledovaniya [Basic research]. 2-1, 197–201. (in Russ.)
14. Babovic, J., Ignjatijevic, S., Dordevic, D. (2011) Supply, Demand and Elasticity Of Fish, Economics of Agriculture, Institute of Agricultural Economics, vol. 58(4). – URL: <https://ideas.repec.org/a/ags/iepeoa/245086.html>
15. USDA-ESR database. Demand Elasticities From Literature. – URL: https://data.ers.usda.gov/reports.aspx?ID=17825#P402584b485d84ae1bc7dd957ca1fbc4_4_214
16. Ratsional'nyye normy potrebleniya pishchevykh produktov [Rational norms of food consumption]. Ministry of Health of the Russian Federation. Open data. – URL: <https://minzdrav.gov.ru/opendata/7707778246-normpotrebproduct/visua> (in Russ.)
17. Sinyakov S.A. (2015) Pokazateli i tendentsii rossiyskogo rybnogo rynka [Indicators and trends of the Russian fish market]. Rybnoye khozyaystvo [Fish industry]. 6, 22–29. (in Russ.)
18. Vasil'yev A.M. (2016) O stroitel'stve novykh traulerov, o proizvodstve ryboproduktsii vysokoy stepeni obrabotki i drugikh problemakh v oblasti rybnogo khozyaystva [On the construction of new trawlers, on the production of fish products of a high degree of processing and other problems in the field of fisheries] Rybnoye khozyaystvo. [Fish industry]. 3, 9–15. (in Russ.)
19. Mnatsakanyan A.G., Kuzin V.I., Kharin A.G. (2020) O nekotorykh sovremennykh tendentsiyakh v razvitii rossiyskogo rybnogo khozyaystva. Chast' 9. Problemy nalogooblozheniya rybnoy otrasli [Some modern trends in the development of the Russian fish industry. Part 9. Problems of taxation of the fishing industry]. Baltiyskiy ekonomicheskiy zhurnal. [Baltic Economic Journal]. 3, 57–72. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Альберт Гургенович Мнацаканян, доктор экономических наук, профессор, директор института отраслевой экономики и управления, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: mag@klgtu.ru

Albert G. Mnatsakanyan, Dr. Sci. (Econ), Professor, Director of the Institute of Sectoral Economics and Management, Kaliningrad State Technical University, Sovetsky pr., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: mag@klgtu.ru

Анатолий Михайлович Карлов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инструментальных методов в экономике, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: anatolij.karlov@klgtu.ru

Anatoly M. Karlov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Instrumental Methods in Economics, Kaliningrad State Technical University, Sovetsky pr., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: anatolij.karlov@klgtu.ru

Александр Геннадьевич Харин, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры отраслевых и корпоративных финансов, Калининградский государственный технический университет, 2360, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: aleksandr.harin@klgtu.ru

Alexander G. Kharin, Ph.D. (Econ), assistant professor, Department of Industry and Corporate Finance, Kaliningrad State Technical University, Sovetsky pr., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: aleksandr.harin@klgtu.ru

Поступила в редакцию: 27.07.2021

Принята к публикации: 29.11.2021

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

УДК 519.65:614.846:621.671

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.020>

Гидравлический расчет системы пожаротушения портовых сооружений

В.А. Наумов¹, e-mail: van-old@mail.ru, Н.Л. Великанов², e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,
А.В. Тришина¹, e-mail: anz7898@yandex.ru

¹Калининградский государственный технический университет, ²Балтийский федеральный университет им. И. Канта

Аннотация. Цель статьи – разработать алгоритм расчёта гидравлических характеристик системы пожаротушения для портовых сооружений. В системе пожаротушения имеется погружной насос, трубопроводы, предназначенные для транспортировки воды от места ее забора, до места возможного возгорания. Использован насос UGP-M-1210-04. Задачи исследования: анализ результатов испытаний; получение эмпирических зависимостей показателей работы насоса от его производительности, исследования работы насоса в сети. Проведены расчеты скорости истекающей струи и полной реактивной силы в рабочей точке насосной установки. Исследовано влияние скорости на реактивную силу. Анализ результатов показывает, что точность расчетов приемлема для инженерных расчетов. Полученный алгоритм расчета может быть использован при проектировании систем тушения пожаров в портовых сооружениях.

Ключевые слова: противопожарный погружной насос, системы пожаротушения портовых сооружений, скорости истекающей струи, реактивная сила.

Hydraulic calculation of the fire extinguishing system of port facilities

Vladimir A. Naumov¹, e-mail: van-old@mail.ru, Nikolay L. Velikanov², e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,
Anzhelika V. Trishina¹, e-mail: anz7898@yandex.ru

¹Kaliningrad State Technical University, ²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The purpose of the article is to develop an algorithm for calculating the hydraulic characteristics of a fire extinguishing system for port facilities. The fire extinguishing system has a submersible pump, pipelines intended for transporting water from the place of its intake to the place of possible ignition. The UGP-M-1210-04 pump is used. Research objectives: analysis of test results; obtaining empirical dependencies of pump performance indicators on its performance, research of pump operation in the network. Calculations of the velocity of the expiring jet and the total reactive force at the working point of the pumping unit are carried out. The effect of velocity on the reactive force is investigated. Analysis of the results shows that the accuracy of calculations is acceptable for engineering calculations. The resulting calculation algorithm can be used in the design of fire extinguishing systems in port facilities.

Key words: fire-fighting submersible pump, fire extinguishing systems of port facilities, expiring jet speeds, reactive power

Введение

Морской порт является сложным комплексом, состоящим из сооружений, различных средств погрузки, складских помещений. При тушении пожара необходимо подать большой объем жидкости в определенное место. В статье [1] рассказывается об использовании высокопроизводительных насосных гидрантов для транспортировки воды к крупным пожарам. Подробно описана система гидрантов, ее основные части, принцип действия и параметры производительности. Делается вывод о целесообразности использования системы при тушения крупных пожаров и других чрезвычайных ситуаций.

Для борьбы с крупными пожарами на судах требуются большие ресурсы, поэтому планирование на случай непредвиденных обстоятельств в портовом сообществе имеет решающее значение [2]. Достижение наивысшего уровня готовности к

реагированию – это эволюционный процесс, усложняемый сегодняшними бюджетными ограничениями, как для правительства, так и для промышленности.

Для того, чтобы полностью обезопасить персонал и сберечь материальные ценности, систему пожаротушения морского порта (СПМП) делают максимально эффективной и универсальной. СПМП включает автоматическую пожарную сигнализацию и систему оповещения, автономные устройства автоматического пожаротушения; противопожарный водопровод с гидрантами и лафетами.

Основными исполнительными устройствами системы пожаротушения порта являются стационарные лафетные стволы (СЛС) со сменными насадками. Как правило, СЛС размещают на специальных вышках для обеспечения большей зоны покрытия, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Стационарный лафетный ствол СЛС в вышке [3]

СЛС присоединены к противопожарному водопроводу. Сменные насадки требуются из-за разнообразных грузов, которые могут иметь различные характеристики пожарной опасности. Основными огнетушащими веществами, используемыми в СЛС, являются вода и пена.

При проектировании СЛС необходимо выполнить ее гидравлический расчет. Общепринятой является приближенная методика для расчета параметров, она используется во многих учебниках и учебных пособиях [4, 5]. Проводятся исследования по совершенствованию таких методов (см. [6-8] и библ.). Однако, как правило, в расчетах используют паспортные (номинальные) значения напора и подачи насосов, что может привести к заметным ошибкам.

В [9] был выполнен анализ рабочих характеристик центробежных судовых противопожарных насосов и показано, как с их помощью находить параметры рабочей точки насосной установки. Цель данной статьи - изучить особенности гидравлического расчета СЛС с учетом рабочих характеристик применяемых в них насосов.

1. Аппроксимация нагрузочных характеристик

Гидравлическая схема типовой системы пожаротушения морского порта представлена на рис. 2. Обозначения: ПЦН – погружной центробежный насос, В – вентиль, ПГ-1 – пожарный гидрант с указанием диаметра, СЛС – стационарный лафетный ствол для подачи компактной водяной струи; H_0 – глубина погружения ПЦН, h – высота установки СЛС, L_1 , L_2 – длины участков нагнетательного трубопровода.

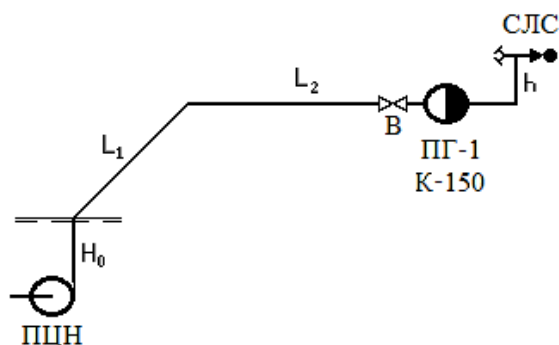


Рис. 2. Гидравлическая схема типовой СЛС

Последнее время в СЛС используются центробежные насосы для морской воды (ПЦН). ПЦН – это специальный тип погружных многоступенчатых центробежных насосов с нижним забором воды, предназначенный для больших напоров и подач. Производители ПЦН (например, [10, 11]) устанавливают электродвигатель герметично в верхней части агрегата, что позволяет откачивать воду до минимального уровня. Двигатель охлаждается перекачиваемой средой. Большая линейка производимых ПЦН и возможность изменения количества ступеней позволяют подобрать агрегат, удовлетворяющий требованиям СЛС.

Необходимые для исследования исходные данные были получены от производителя ПЦН компании Indar [11]. Для насосов из табл. 1 в [11] имеются полученные в результате испытаний зависимости напора и затраченной мощности от подачи.

Обозначения в табл. 1: m – максимальное количество ступеней, Q_m – максимальная подача, H_1 , N_1 – напор и затраченная мощность на одну ступень при максимальной подаче.

Таблица 1

Технические параметры ПЦН серии UGP-M [11]

Модель	m	Q_m , дм ³ /с	H_1 , м	N_1 , кВт
0820	20	22	21,1	6,40
0840	16	38	21,4	11,6
1020	15	68	17,1	16,5
1030	15	100	11,2	22,4
1210	13	124	24,9	56,9
1325	11	190	26,3	57,1
1410	5	210	42,0	117,4
1520	3	286	44,7	184,3

Пример нагрузочных характеристик приведен на рис. 3 для насоса UGP-M-1210-04 (4 ступени) при частоте вращения рабочего колеса $n = 2940$ об/мин.

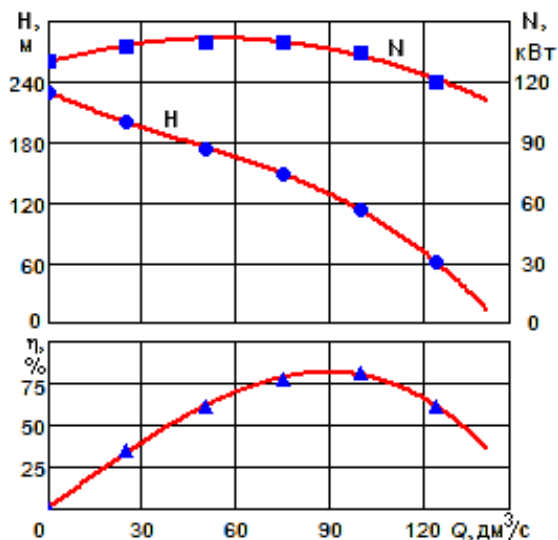


Рис. 3. Зависимость напора H , затраченной мощности N и КПД η UGP-M-1210-04 от подачи. Точки – опытные данные [11]

Рабочие характеристики на рис. 3, как в [9], аппроксимировались многочленами (1):

$$Y_i = f(Q) = b_{0i} + b_{1i}Q + b_{2i}Q^2 + b_{3i}Q^3, Y = \{H, N, \eta\}, \quad (1)$$

где b_{ji} – эмпирические коэффициенты, найденные методом наименьших квадратов. Причем $b_3 \neq 0$ только для напора. Это обусловлено возрастанием H при малых Q , что характерно для ПЦН.

2. Напорная характеристика трубопровода

Напорная характеристика трубопровода, приведенного на рис. 2, имеет вид (2):

$$H_p = \varphi(Q) = H_c + A \cdot Q^2, H_c = H_0 + h, \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{2g\omega^2} \left(\lambda \frac{L}{D} + \sum \zeta_M + (\zeta_C + 1) \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right), \quad (3)$$

$$L = L_1 + L_2 + H_0 + h, \omega = \pi D^2/4,$$

где H_c – статический напор сети, g – ускорение свободного падения, D – внутренний диаметр трубопровода, d – выходной диаметр насадки СЛС, ω – площадь поперечного сечения трубопровода, ζ_M – коэффициенты местных гидравлических потерь трубопровода, ζ_C – коэффициент гидравлических потерь насадки СЛС.

Последнее слагаемое в формуле (3) обусловлено скоростным напором на выходе из насадки СЛС. В гидравлических расчетах противопожарных систем, как правило, это слагаемое объединяют с потерями в насадке СЛС по формуле (4):

$$H_H = \Delta h_H + \frac{W_H^2}{2g} = (\zeta_C + 1) \cdot \frac{Q^2}{2g\omega_H^2} = S_H \cdot Q^2, \quad (4)$$

где W_H – скорость жидкости на выходе из насадки ствола. Размерную величину S_H принято называть «сопротивление насадка пожарного ствола» (см., например, [4, с. 71]). Такое название не соответствует физическому смыслу, так как H_H включает не только гидравлические потери, но и скоростной напор на выходе из насадка.

Из оценки [6] следует, что в зависимости от конструкции коэффициент ζ_C может принимать

значения 0,066-0,326. В данной статье в расчетах принято $\zeta_C = 0,2$.

Коэффициент гидравлических потерь по длине трубопровода рассчитывался по известной формуле Альтшуля (5):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, Re = \frac{W \cdot D}{\nu}, \quad (5)$$

где Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость трубопровода; Re – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость воды, $W = Q/\omega$ – скорость воды в трубопроводе.

3. Рабочая точка насосной установки

В данной статье расчет выполнен при $L_1 = L_2 = 150$ м; $H_0 = h = 10$ м; $D = 150$ мм. Плотность и кинематическая вязкость воды были приняты, как в Онежском заливе Белого моря зимой: $\rho = 1021$ кг/м³; $\nu = 1,78 \cdot 10^{-6}$ м²/с [12]. Впрочем, течение в трубопроводе СПМП происходит в автомодельной области сопротивления (при $Re > 10^5$), поэтому значение ν на результаты расчета не влияет.

Вначале был выполнен гидравлический расчет СПМС до пожарного гидранта ПГ-1 (без СЛС) для новых стальных труб ($\Delta = 0,1$ мм), затем – для стальных труб после длительной эксплуатации ($\Delta = 0,7$ мм). Результаты показаны на рис. 4.

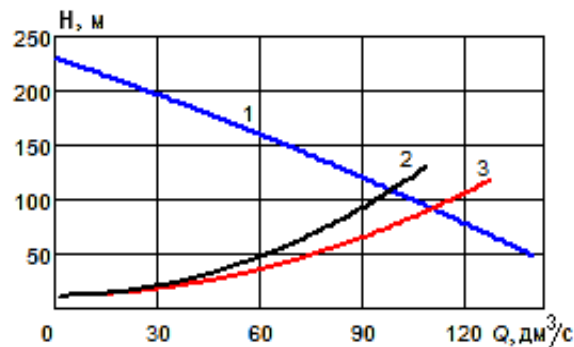


Рис. 4. Определение рабочей точки насосной установки без СЛС: 1 – напорная характеристика UGP-M-1210-04; 2 – характеристика трубопровода при $\Delta = 0,7$ мм; 3 – $\Delta = 0,1$ мм

Увеличение Δ приводит к росту гидравлического сопротивления трубопровода. В первом случае расход воды в рабочей точке (пересечение линий 1 и 3 на рис. 4) был 110,4 дм³/с, во втором (пересечение линий 1 и 2) уменьшился до 98,5 дм³/с.

Было исследовано влияние диаметра насадки СЛС на рабочую точку насосной установки. По рис. 5 видно, что при уменьшении d увеличивается потребный напор и снижается расход воды. Причина такого явления заключается в увеличении скорости воды на выходе из СЛС. Что приводит к росту гидравлических потерь в насадке ствола и скоростного напора струи. Результаты расчета напора и подачи показаны в табл. 2

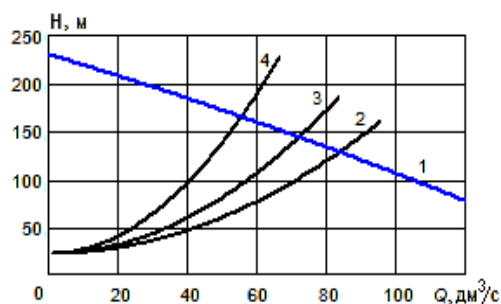


Рис. 5. Определение рабочей точки насосной установки: 1 – напорная характеристика UGP-M-1210-04; 2 – характеристика трубопровода при $d = 60$ мм; 3 – $d = 50$ мм; 4 – $d = 40$ мм

Полная реактивная сила струи из СЛС может быть оценена по формуле (6):

$$R = \rho \cdot Q^2 / \omega_n. \quad (6)$$

В табл. 2 представлены результаты расчета скорости истекающей струи и полной реактивной силы в рабочей точке насосной установки. В расчетах использован метод, подробно описанный в [13, 14]. Увеличение скорости не приводит к заметному росту R_T . Более того, достигнув максимума, сила реакции начинает снижаться. Такой эффект обусловлен увеличением площади выходного сечения насадка СЛС.

Таблица 2

Параметры рабочей точки насосной установки				
d , мм	Q_T , dm^3/s	H_T , м	W_n , м/с	R_T , кН
40	55,5	165,4	44,1	2,50
45	64,4	155,2	40,5	2,66
50	72,1	144,2	36,7	2,71
55	78,5	135,7	33,1	2,65
60	83,8	128,7	29,6	2,54
65	87,9	123,2	26,5	2,38

Литература

1. Dermek M., Monosi M. Use of high-capacity pump for fire-fighting. Fire protection, safety and security. International Scientific Conference on Fire Protection, Safety and Security. 2017. Zvolen, Slovakia. P. 269-274.
2. Bateman V.F., Montoro D.P. The evolution of marine fire-fighting contingency planning and exercising at the Marine Safety Office San Francisco Bay. International oil spill conference: improving environmental protection. FT Lauderdale, FL. API. 1997. P. 627-630.
3. Регион. Система пожаротушения порта [Электронный ресурс]. Режим доступа – свободный: <https://dc-region.ru/sistema-pozharotusheniya-porta> (дата обращения: 16.09.2021).
4. Абросимов Ю.Г., Жучков В.В., Мышак Ю.А. и др. Противопожарное водоснабжение: учебник. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2008. 310 с.
5. Малый В.П., Масаев В.Н., Вдовин О.В. и др. Противопожарное водоснабжение: учебное пособие. Железногорск: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. 131 с.
6. Качанов И.В., Карпенчук И.В., Красовский А.И. Сопротивление пожарных стволов // Вестник БНТУ. 2010. № 2. С. 58-63.
7. Пефтибай Г.И., Галухин Н.И., Чайковская Э.Г. Математическое описание переходных процессов в системе «насос – пожарный рукав – ствол» // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2016. № 4(53). С. 84-92.
8. Малютин О.С., Васильев С.А. Проблема гидравлического расчета насосно-рукавных систем в пожарной тактике // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 4 (11). С. 67-72.
9. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Тришина А.В. Анализ характеристик центробежных судовых противопожарных насосов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 (46), Т.4. С. 166-170.
10. Wilo-Польдерные насосы EMU [Электронный ресурс]. Режим доступа – свободный: <https://wilo.com/> (дата обращения: 16.09.2021).
11. Завод Indar. Погружные польдерные насосы серии UGP-M [Электронный ресурс]. Режим доступа – свободный: <https://indar.ru/products/production/indar-sp-ugp-m.html> (дата обращения: 16.09.2021).
12. Шилова Н.А., Студёнов И.И. Особенности расчета гидравлической крупности частиц при моделировании начальной концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 4. С. 295–307.

Заключение

Выполненный гидравлический расчет системы пожаротушения сооружений порта до пожарного гидранта (без стационарных лафетных стволов) для новых стальных труб и для стальных труб после длительной эксплуатации показал, что гидравлическое сопротивление трубопровода увеличилось, расход воды в рабочей точке уменьшился.

Исследовано влияние диаметра насадки стационарных лафетных стволов на рабочую точку насосной установки. При уменьшении диаметра увеличивается потребный напор и снижается расход воды. Причина такого явления заключается в увеличении скорости воды на выходе из стационарного лафетного ствола. Это приводит к росту гидравлических потерь в насадке ствола и скоростного напора струи.

Проведены расчеты скорости истекающей струи и полной реактивной силы в рабочей точке насосной установки. Увеличение скорости не приводит к заметному росту силы. Достигнув максимума, сила реакции начинает снижаться. Что обусловлено увеличением площади выходного сечения насадка стационарных лафетных стволов. Полученный алгоритм расчета может быть использован при проектировании систем тушения пожаров в портовых сооружениях.

13. Naumov V.A., Velikanov N.L. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps. IOP Conference Series: Materials Science and Engineeringthis. 2019, V. 537(3), 032029.
14. Naumov V.A. Influence of leakage on characteristics of the vacuum transport unit based on the water-ring pump. IOP Conference Series: Materials Science and Engineeringthis. 2020, V. 862(3), 032007.

References

1. Dermek M., Monosi M. (2017) Use of high-capacity pump for fire-fighting. Fire protection, safety and security. International Scientific Conference on Fire Protection, Safety and Security. Zvolen, Slovakia. P. 269-274.
2. Bateman V.F., Montoro D.P. (1997) The evolution of marine fire-fighting contingency planning and exercising at the Marine Safety Office San Francisco Bay. International oil spill conference: improving environmental protection. FT Lauderdale, FL. API. P. 627-630.
3. Region. Sistema pozharotusheniya porta [Region. Port fire extinguishing system]. [Electronic resource]. Access mode - free: <https://dc-region.ru/sistema-pozharotusheniya-porta> (accessed: 09/16/2021).
4. Abrosimov Yu.G., Zuchkov V.V., Myshak Yu.A. i dr. (2008) Protivopozharnoe vodosnabzhenie: uchebnik [Fire-fighting water supply: textbook]. Moscow: Akademiya GPS MCHS Rossii. 310 s.
5. Malyj V.P., Masaev V.N., Vdovin O.V. i dr. (2017) Protivopozharnoe vodosnabzhenie: uchebnoe posobie [Fire-fighting water supply: textbook]. Zheleznogorsk: FGBOU VO Sibirskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii. 131 s.
6. Kachanov I.V., Karpenchuk I.V., Krasovskij A.I. (2010) Soprotivlenie pozharnyh stvolov [Resistance of fire barrels]. Vestnik BNTU. No. 2. S. 58-63.
7. Peftibaj G.I., Galuhin N.I., Chajkovskaya E.G. (2016) Matematicheskoe opisaniye perekhodnyh processov v sisteme "nasos – pozharnyj rukav – stvol" [Mathematical description of transients in the system "pump – fire hose – trunk"]. Nauchnyj vestnik NIIGD "Respirator". No. 4(53). S. 84-92.
8. Malyutin O.S., Vasil'ev S.A. (2018) Problema gidravlicheskogo rascheta nasosno-rukavnyh sistem v pozharnoj taktike [The problem of hydraulic calculation of pump-bag systems in fire tactics]. Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik. Mo. 4(11). S. 67-72.
9. Naumov V.A., Velikanov N.L., Trishina A.V. (2019) Analiz harakteristik centrobezhnyh sudovyh protivopozhar-nyh nasosov [Analysis of characteristics of centrifugal ship fire-fighting pumps]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. No. 4(46), V.4. S. 166-170.
10. Wilo-Pol'dernye nasosy EMU [Electronic resource]. Access mode - free: <https://indar.ru/products/production/indar-sp-ugp-m.html> (accessed: 09/16/2021).
11. Zavod Indar. Pogruzhnye pol'dernye nasosy serii UGP-M [Electronic resource]. Access mode - free: <https://indar.ru/products/production/indar-sp-ugp-m.html> (accessed: 09/16/2021).
12. Shilova N.A., Studyonov I.I. (2017) Osobennosti rascheta gidravlicheskoy krupnosti chastic pri modelirovanii nachal'noj koncentracii vzveshennyh veshchestv v priust'evykh rajonah arkticheskikh morej [Features of calculating the hydraulic particle size when modeling the initial concentration of suspended solids in the estuarine areas of the Arctic seas]. Arctic Environmental Research. V. 17, No. 4. S. 295–307.
13. Naumov V.A., Velikanov N.L. (2019) Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps. IOP Conference Series: Materials Science and Engineeringthis. V. 537(3), 032029.
14. Naumov V.A. (2020) Influence of leakage on characteristics of the vacuum transport unit based on the water-ring pump. IOP Conference Series: Materials Science and Engineeringthis. V. 862(3), 032007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Аркадьевич Наумов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: van-old@mail.ru

Vladimir A. Naumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of The Water Resources & Water Use Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: van-old@mail.ru

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

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

Анжелика Владимировна Тришина, аспирант, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: anz7898@yandex.ru

Anzhelika V. Trishina, student, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: anz7898@yandex.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2021
Принята к публикации: 29.10.2021

Моделирование процесса воздействия ударной волны на объекты портовой инфраструктуры

А.В. Фадеев¹, e-mail: andreyfad1993@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация Факты возникновения аварийных и катастрофических состояний портовой инфраструктуры при погрузке (выгрузке) взрывчатых веществ свидетельствуют о наличии проблемы связанной с построением системы обеспечения безопасности при грузовых операциях и мест их складирования. Неправильно выбранные: место, техническое сопровождение и организация погрузки взрывчатых веществ, в определенных условиях становятся причинами возникновения катастрофических ситуаций разного уровня опасности. При моделировании ситуаций рассматривается использование метода крупных частиц и теории точечного взрыва при воздействии ударной волны на объекты портовой инфраструктуры. Математическая модель метода заключается в разделении по физическим процессам исходной нестационарной системы уравнений Эйлера, записанной в форме законов сохранения. Процесс вычислений состоит из многократных итераций, каждая из которых содержит три этапа. Основанием для разработки программы является необходимость компьютерного моделирования процесса возникновения и развития ударной волны в условиях сложного рельефа местности, вызванной подрывом заряда конденсированного взрывчатого вещества. Автор считает, что такой подход существенно улучшит скорость и качество оценки безопасности выбранной системы погрузки (выгрузки) взрывоопасных и взрывчатых веществ, потенциальных рисков возникновения различных катастрофических состояний, и прогноза сценария их развития.

Ключевые слова: Моделирование, метод крупных частиц, теория точечного взрыва катастрофические состояния, портовая инфраструктура, ударная волна, взрывчатые вещества, алгоритм, прогноз, поражающий фактор.

Modeling of the impact of a shock wave on port infrastructure facilities

Andrey V. Fadeev¹, e-mail: andreyfad1993@mail.ru

¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The facts of the occurrence of emergency and catastrophic conditions of the port infrastructure during the loading (unloading) of explosives indicate the existence of a problem associated with the construction of a security system for cargo operations and their storage locations. Incorrectly chosen: location, technical support and organization of loading of explosives, under certain conditions, become the causes of catastrophic situations of different levels of danger. When modeling situations, the use of the large particle method and the theory of a point explosion under the impact of a shock wave on port infrastructure facilities is considered. The mathematical model of the method consists in the separation by physical processes of the initial non-stationary system of Euler equations, written in the form of conservation laws. The calculation process consists of multiple iterations, each of which contains three stages. The basis for the development of the program is the need for computer modeling of the process of the occurrence and development of a shock wave in a complex terrain caused by the detonation of a charge of a condensed explosive. The author believes that such an approach will significantly improve the speed and quality of the safety assessment of the selected system of loading (unloading) of explosive and explosive substances, the potential risks of various catastrophic conditions, and the forecast of their development scenario.

Key words: Modeling, large particle method, point explosion theory, catastrophic conditions, port infrastructure, shock wave, explosives, algorithm, forecast, striking factor.

Введение

Факты возникновения аварийных и катастрофических состояний портовой инфраструктуры при детонации грузов взрывчатых веществ (ВВ), свидетельствуют о наличии проблемы связанной с построением системы обеспечения безопасности [9] при грузовых операциях. Неправильно выбранное место, техническое сопровождение и организация погрузки ВВ, в определенных условиях становятся причинами возникновения катастрофических ситуаций разного уровня опасности. Для оценки безопасности выбранной системы погрузки (выгрузки) взрывоопасных и взрывчатых веществ (ПВВ) необходимо уметь выявлять не только потенциальные риски возникновения различных аварий, но и прогнозировать сценарии их развития. Лучшим способом решения такой сложной, многокритериальной задачи, является компьютерное

моделирование. Однако на данный момент выявить необходимый для этого математический и методико-алгоритмический аппарат не удалось.

1. Математическая модель

Основным поражающим фактором взрыва, способным повлечь большие материальные и человеческие потери, является ударная волна (УВ) [9]. Процесс ее распространения лучше отображается классической системой уравнений газовой динамики, записанной в виде балансовых уравнений, выражающих основные законы сохранения в интегральной форме [1 – 7]. Математическая модель, представленная таким образом, не зависит от выбора системы координат и удобна при реализации численными методами.

Параметры процесса распространения УВ в определенном объеме W , ограниченном поверхностью с площадью S , в данном случае более

точно отображаются уравнениями характеризующих движение идеального газа [1 – 6].

Уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \rho \cdot dW = - \oint_S \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS \text{ кг/м}^3. \quad (1)$$

Уравнением движения газа:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \rho \cdot \vec{V} \cdot dW = - \oint_S (\rho \cdot \vec{V}) \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS - \int_W \text{grad} p \cdot dW \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

Уравнением баланса энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \rho \cdot E \cdot dW = - \oint_S \rho \cdot E \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n}) + p \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n}) \cdot dS \text{ Па}, \quad (3)$$

где p – давление, Па;
 ρ – плотность, кг/м³;
 E – полная энергия, м²/с²;
 \vec{V} – вектор скорости м/с;
 \vec{n} – вектор нормали к поверхности.

Для учета параметров течения продуктов детонации в реальной воздушной среде, дополнительно используется уравнение изменения соотношения между компонентами газовой смеси [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \gamma \cdot \rho \cdot dW = - \oint_S \gamma \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS \text{ кг/м}^3, \quad (4)$$

где γ – показатель адиабаты газовой смеси.
 Полная удельная энергия УВ определяется как:
 $E = e + (u^2 + v^2)/2 \text{ м}^2/\text{с}^2, \quad (5)$
 где u – горизонтальная компонента вектора скорости, м/с;
 v – вертикальная компонента вектора скорости, м/с;
 e – удельная внутренняя энергия газовой смеси:
 $e = p / ((\gamma - 1) \cdot \rho) \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (6)$

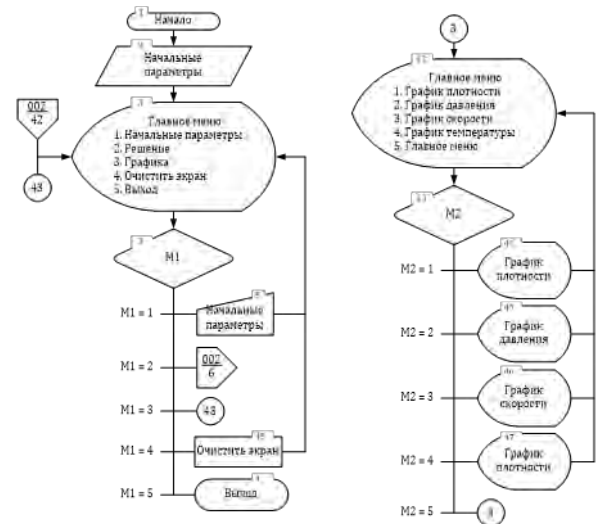
Начальные и граничные условия математического моделирования принимались таким образом, чтобы обеспечивалась достаточная точность расчетов и сохранялся физический смысл текущих процессов распространения УВ. С этой целью этого предполагалось, что:

- газодинамические параметры газа во всей расчетной и в локальной зонах известны;
- в зоне контакта газа с твердыми телами существуют условия непротекания;
- на границах счетной зоны предполагаются условия свободной поверхности;
- в случае решения осесимметричной задачи на верхней границе расчетной зоны (ось симметрии) задаются условия симметрии течения.

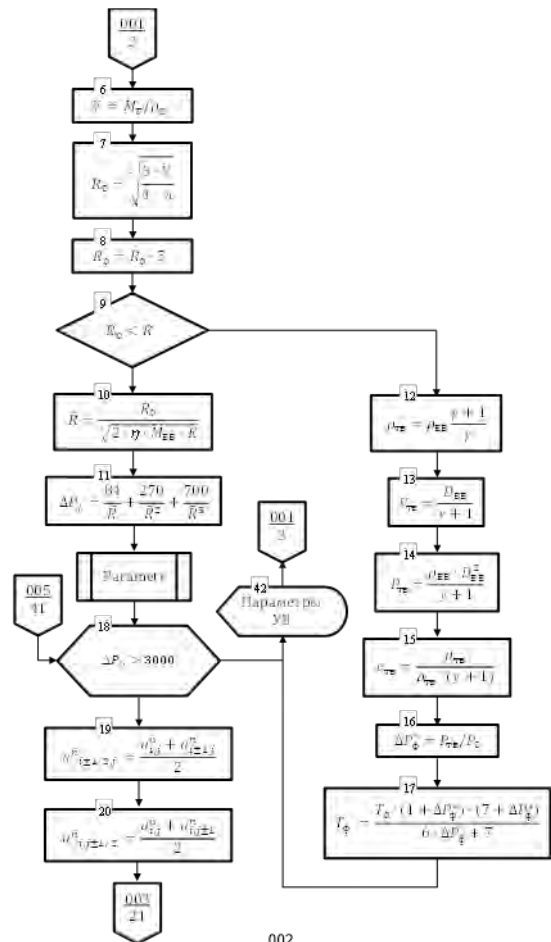
Уравнения (1 – 6) являются замкнутой системой и с достаточной полнотой отображают параметры процесса течения многокомпонентного сжимаемого газа [1 – 6]. Полученная математическая модель решается только с использованием численных методов, причем выбор метода во многом обуславливает точность полученных результатов.

2. Блок-схема алгоритма

Компьютерное моделирование процесса воздействия УВ на объекты портовой инфраструктуры, изображено на (рис. 1).



001



002

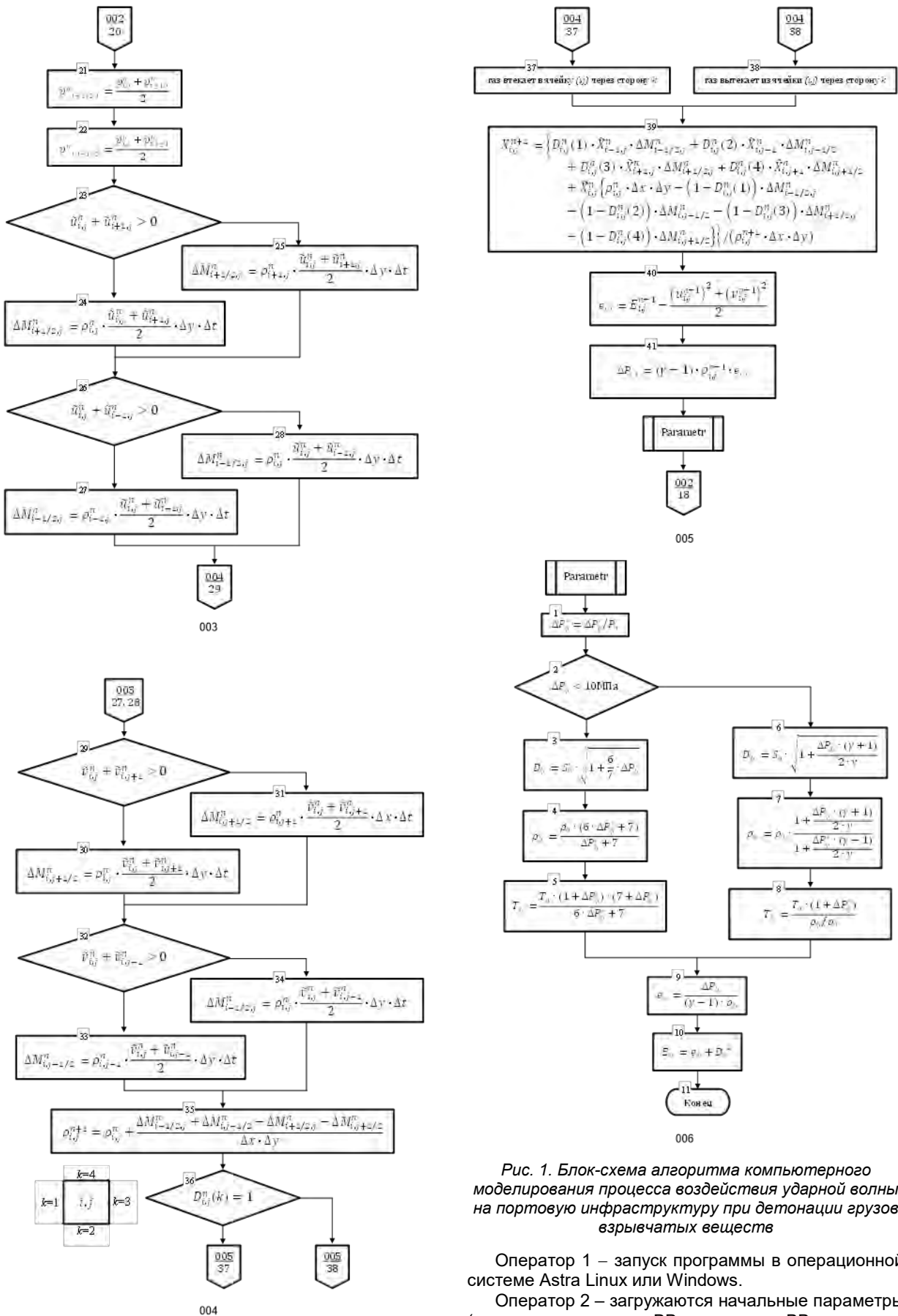


Рис. 1. Блок-схема алгоритма компьютерного моделирования процесса воздействия ударной волны на портовую инфраструктуру при детонации грузов взрывчатых веществ

Оператор 1 – запуск программы в операционной системе Astra Linux или Windows.

Оператор 2 – загружаются начальные параметры (скорость детонации ВВ, плотность ВВ, давление

окружающей среды, показатель адиабаты, плотность воздуха и скорость звука).

Оператор 3 – главное меню программы «Эксплозия – 1.0» (рис. 2) [10 – 14].



Рис. 2. Главное меню программы «Эксплозия – 1.0»

Оператор 5 – ввод начальных параметров (температура окружающей среды, характер подстилающей поверхности, расстояние до объекта, вид взрывчатого вещества и масса ВВ) (рис. 3).

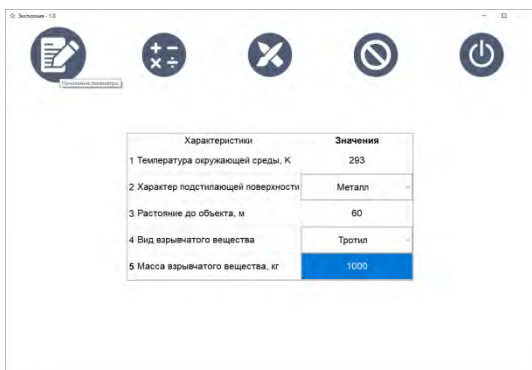


Рис. 3. Начальные параметры

Оператор 6-11, 18-42 – математическая модель метода крупных частиц (рис. 4).

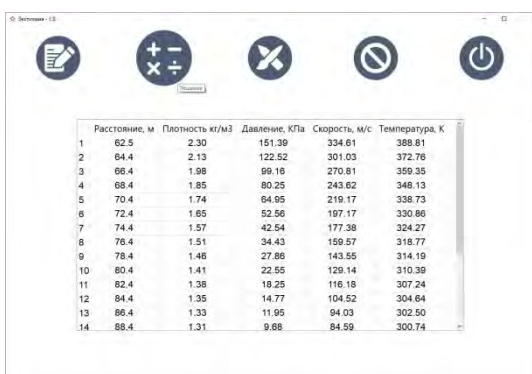


Рис. 4. Математическая модель метода крупных частиц

Оператор 12-17 – математическая модель теории точечного взрыва (рис. 5).



Рис. 5. Математическая модель теории точечного взрыва

Оператор 43 – главное меню графики (рис. 6 – 9)
Оператор 44 – вывод графика плотности на экран (рис. 6).

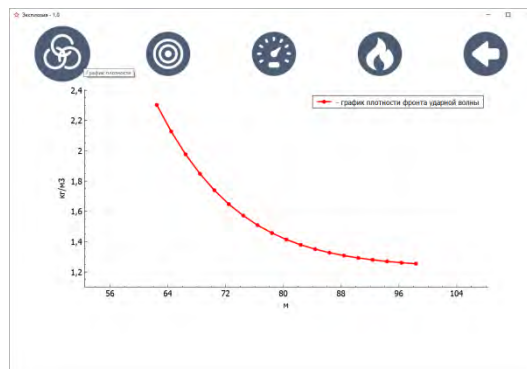


Рис. 6. График плотности

Оператор 45 – вывод графика давления на экран (рис. 7).

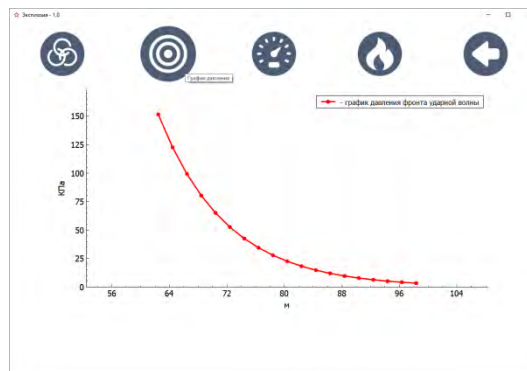


Рис. 7. График давления

Оператор 46 – вывод графика скорости на экран (рис. 8).

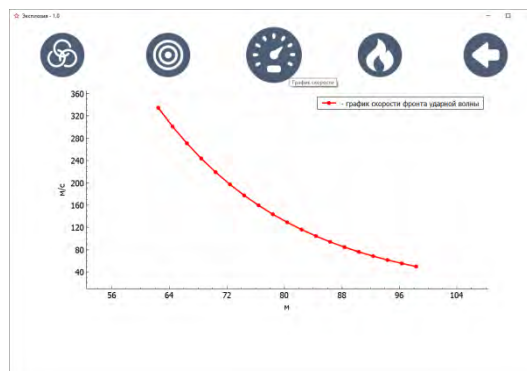


Рис. 8. График скорости

Оператор 47 – вывод графика температуры на экран (рис. 9).

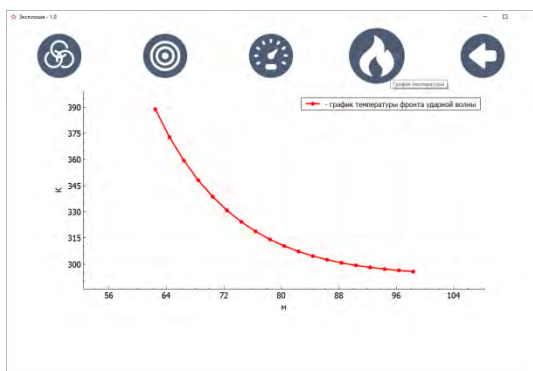


Рис.9. График температуры

Оператор 43.5 – возврат в главное меню программы «Эксплозия – 1.0» (рис. 2).

Оператор 48 – возврат программы к первоначальным параметрам.

Оператор 4 – выход из программы.

3. Методика моделирования

Существует множество численных методов, предназначенных для решения газодинамических задач. При решении данной задачи лучшие результаты удалось получить при использовании метода крупных частиц (КЧ) [2, 5, 6]. Выбор данного метода определился следующими его качествами:

- позволяет организовать решение нелинейных уравнений газовой динамики по единому алгоритму для дозвуковых и сверхзвуковых течений вязкого и невязкого газа;

- дает лучшие результаты при выполнении компьютерных инженерных расчетов;

- удобен для решений круга задач данного исследования.

Суть метода заключается в разделении по физическим процессам исходной нестационарной системы уравнений Эйлера, записанной в форме законов сохранения. Газовая среда представляется в виде системы из жидких (крупных) частиц, совпадающих в каждый момент времени с ячейкой Эйлера сетки. Процесс вычислений состоит из многократных итераций, каждая из которых содержит три этапа:

1. *Эйлеров этап.* Определяются промежуточные значения скорости и полной удельной энергии потока масс. Для этого эффектами, связанными с перемещением элементарных ячеек, пренебрегают; считают, что движение потока масс через границы ячеек отсутствует; учитываются эффекты от ускорения жидкости только за счет изменения давления.

2. *Лагранжев этап.* Вычисляются потоки масс жидкости, движущейся через границы Эйлеровых ячеек.

3. *Метод КЧ.* Рассчитываются параметры движения непрерывных потоков масс через границы Эйлеровых ячеек, с использованием уравнений (1 – 4). Параметры потоков определяются из закона сохранения массы, записанного в разностной форме для каждой КЧ, совпадающей в данный момент с Эйлеровой ячейкой.

Учитывая, что основные разрушения УВ вызывает в приземной области, данную задачу достаточно решить в двумерной постановке.

При рассмотрении задачи в такой постановке, на область интегрирования накладывается Эйлерова (фиксированная в пространстве) расчетная сетка в двумерной системе координат (рис. 10), состоящая из прямоугольных ячеек со сторонами Δx , Δy расположенных с шагом i, j вдоль осей Ox и Oy соответственно, где i, j – номер ячейки сетки.

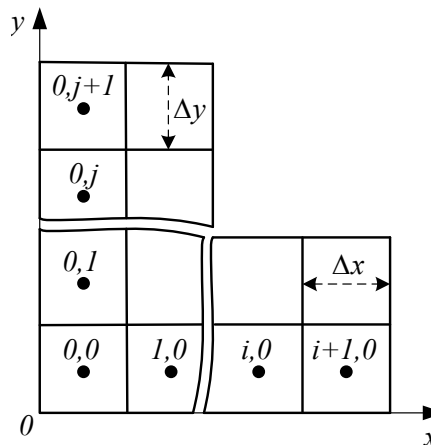


Рис. 10. Расчетная сетка метода крупных частиц

На I (Эйлеровом) этапе расчета изменяются лишь величины, относящиеся к КЧ в целом: исследуется Лагранжев элементарный объем газа, заключенный внутри Эйлеровой ячейки; рассматривается изменение его импульса и энергии за время Δt (рис. 1, операторы 19 – 22).

На II (Лагранжевом) этапе вычисляются эффекты переноса, которые учитывают обмен между ячейками при их перестройке на исходную Эйлерову сетку; определяются параметры потоков масс частиц ΔM^n , протекающих за время Δt через границы Эйлеровых ячеек; при этом считается, что вся масса переносится со скоростью, равной нормальной составляющей ее вектора к границе ячейки [4] (рис. 1, операторы 23 – 34).

На III этапе происходит перераспределения массы, импульса и энергии по площади и определяются окончательные поля Эйлеровых параметров потока на фиксированной сетке в момент времени:

$$t^{n+1} = t^n + \Delta t. \quad (7)$$

Уравнения этого этапа представляют собой законы сохранения массы M , импульса P , полной энергии E и записываются в разностной форме:

$$F^{n+1} = F^n + \sum F_{гп}^n, F \approx (M, P, E). \quad (8)$$

Из уравнений следует, что внутри потока течения газа нет источников и стоков массы, импульса и полной энергии. Изменение этих величин за время Δt происходит только за счет взаимодействия с окружающей средой на внешней границе Эйлеровой ячейки. Предполагается, что потоки массы ΔM^n через границы ячеек, определяемые на II этапе, несут с собой промежуточные значения скорости и удельной энергии, вычисленные на I этапе. Это значит, что величины ΔM^n играют здесь роль весовых функций.

На следующем шаге вычисляются окончательные значения параметров потока $\rho, X = (u, v, E)$ (рис. 1, оператор 35 – 41 и процедура Parametr).

Для обеспечения универсальности программного модуля и упрощения алгоритма используются ячейки

прямоугольной формы. Это позволяет избежать применения громоздкого алгоритма описания граничных условий, хотя создаст некоторые приемлемые погрешности при расчетах обтекания тел с криволинейной формой поверхности.

Заключение

Представленная математическая модель предназначена для реализации компьютерного моделирования распространения поражающих факторов УВ, образованной при взрыве в системе погрузки (выгрузки) ВВ.

Отклонение параметров УВ полученных при компьютерном моделировании от реальных, составляет не более 7,8%.

Литература

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Нестационарный метод крупных частиц для газодинамических расчетов. – ЖВМ и МФ, 1971, 11, №1, с. 182 – 207.
2. Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц для задач газовой динамики. –Дисс. канд. физ.-матем. наук. М.: МФТИ, 1970.
3. Давыдов Ю.М. Расчет обтекания тел произвольной формы методом крупных частиц. – ЖВМ и МФ, 1971, 11 №4, с. 1056 – 1063.
4. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Численное моделирование сложных задач аэрогазодинамики методом крупных частиц. –Уч. зап. ЦАГИ, 1977, 8; №3, с. 1 – 18 (ч. I); №4, с. 1 – 9 (ч. II); №5 с. 1 – 23 (ч. III).
5. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц (схемы и приложения).– М.: МФТИ, 1978.
6. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент.– М.: Наука 1982.
7. Яненко Н.Н., Анучина Н.Н., Петренко В.Е., Шокин Ю.И. О методах расчета задач газовой динамики с большими деформациями. – В кн.: Числ. Методы механ. сплошной среды. Новосибир.: Наука, 1970, 1, № 1, с. 40 – 62.
8. Забаров А.В., Могильников Н.В. Моделирование нестационарных газодинамических процессов в многокомпонентной системе газов. Изв. Тул. Гос. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика. – Тула: ТулГУ, 1997. – Т.3. – Вып. 1. – С 106 – 1 И.
9. ПБ №13-01-92 «Единые правила безопасности при взрывных работах». Федеральный горный и промышленный надзор России. М. НПО ОБТ, 1993 г.
10. Колисниченко, Д.Н. Ubuntu 10. Библия пользователя. - М. ООО "И.Д. Вильямс", 2010. - 592 с.: ил. ISBN 978-5-8459-1645-7 (рус).
11. РУСБ. 10015-01 95 01-1 «Операционная система специального назначения «ASTRA LINUX SPECIAL EDITION». Руководство администратора. Часть 1», листов 334.
12. Шилдт Герберт С++ для начинающих. Серия «Шаг за шагом» / Шилдт Г.; пер. с англ. – М.: ЭКОМ Паблшерз, 2013. – 640 с.: ил.
13. Сейед Тахагхоги, Хью Е. Вильямс. Руководство по MySQL / Пер. с англ. – М.: Издательство «Русская Редакция»; 2007. – 544 стр.: ил.
14. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на С++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 1072 с.: ил – (В подлиннике)

References

1. Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M. Unsteady method of large particles for gas-dynamic calculations. ZHVM and MF, 1971, 11, No. 1, p. 182 – 207.
2. Davydov Yu.M. Method of large particles for problems of gas dynamics. –Diss. cand. phys.- matem. M.: MIPT, 1970.
3. Davydov Yu.M. Calculation of the flow of bodies of arbitrary shape by the method of large particles. – JVM and MF, 1971, 11 No. 4, pp. 1056 – 1063.
4. Belotserkovskii O. M., Davydov, Y. M. Numerical simulation of complex problems of decision by the method of large particles. –Uch. Zap. TSAGI, 1977, 8; No. 3, p. 1 – 18 (part I); No. 4, p. 1 – 9 (part II); 5 S. 1 – 23 (part III).
5. Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M. Method of large particles (schemes and applications).– M.: MIPT, 1978.
6. Belotserkovsky O.M., Davydov Yu.M. Method of large particles in gas dynamics. Computational experiment. – M.: Nauka 1982.
7. Yanenko N.N., Anuchina N.N., Petrenko V.E., Shokin Yu.I. On methods for calculating problems of gas dynamics with large deformations. – In the book: Num. Methods of mechan. continuous environment. Novosibirsk: Nauka, 1970, 1, No. 1, p. 40 – 62.
8. Zabarov A.V., Mogilnikov N.V. Modeling of unsteady gas dynamic processes in a multicomponent system of gases. Izv. Tula. State, un-ta. Ser. Mathematics. Mechanics. Computer science. Тип Тула: TulSU, 1997. - T.Z. - Issue 1. - With 106 - 1 I.
9. PB No. 13-01-92 «Uniform safety rules for blasting operations». Federal Mining and Industrial Supervision of Russia. M. NPO OBT, 1993.
10. Kolisnichenko, D.N. Ubuntu 10. The User's Bible. - M. I.D. Williams LLC, 2010. - 592 p.: ill. ISBN 978-5-8459-1645-7 (rus).
11. RUSB. 10015-01 95 01-1 «Special purpose operating system «ASTRA LINUX SPECIAL EDITION». Administrator's Guide. Part 1», sheets 334.

12. Schildt Herbert C++ for beginners. The series «Step by step» / Schildt G.; trans. from English - M.: ECOM Publishers, 2013. - 640 p.: ill.
13. Seyed Tahaghoghi, Hugh E. Williams. MySQL Manual / Translated from English. - M.: Publishing House «Russian Edition»; 2007– - 544 p.: ill.
14. Shlee M. Qt 5.10. Professional programming in C++. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2020. - 1072 p.: il - (In the original)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Витальевич Фадеев, аспирант, Калининградского государственного технического университета, 236000, Россия, г. Калининград, Советский просп., д.1, e-mail: andreyfad1993@mail.ru

Andrey V. Fadeev, graduate student, Kaliningrad State Technical University, 236000, Russia, Kaliningrad, Sovetsky Ave., 1, e-mail: andreyfad1993@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 16.11.2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 629.5.015.141:639.2.081.117

https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.022

Математическая модель для определения угла крена рыболовного судна при выборке кошелькового невода

Н.Л. Великанов^{1,2}, e-mail: monolit8@yandex.ru, О.В. Шарков^{1,2}, e-mail: o_sharkov@mail.ru

¹Калининградский государственный технический университет

²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. Лов рыбы с применением кошельковых неводов является наиболее распространенным в мире после тралового лова. Процессы кошелькования невода, выборки улова могут существенно влиять на остойчивость рыболовного судна (сейнера). В данной работе рассматривается влияние на угол крена силы, действующие со стороны орудия лова. Приведен алгоритм расчета, учитывающий координаты точки приложения силы натяжения троса, идущего к орудию лова, углы наклона троса, величину силы. Составлены расчетные зависимости для процессов крена, получены выражения для угла наклона корпуса судна. Приведены примеры расчетов. В частности, рассмотрено изменение угла крена от тягового усилия, высоты подъема канифас-блока для промыслового судна. Проведенные расчеты свидетельствуют о достаточной для инженерных расчетов точности и возможности использовать приведенный алгоритм при оценочных расчетах на различных стадиях проектирования. Важно учитывать возможность одновременного наложения ветровых нагрузок, действия волн на корпус судна. В этих случаях крен и дифферент будут возрастать. Поэтому спецификой промысловых судов является необходимость учета поведения судна при проведении промысловых операций.

Ключевые слова: выборка стяжного троса, крен рыболовного судна, кошельковый лов, тяговое усилие, кренящий момент.

Mathematical model for determining the roll angle of a fishing vessel when purse seine sampling

Nikolay L. Velikanov^{1,2}, e-mail: monolit8@yandex.ru, Oleg V. Sharkov^{1,2}, e-mail: o_sharkov@mail.ru

¹Kaliningrad State Technical University

²Immanuel Kant Baltic Federal University

Abstract. Fishing with the use of purse seines is the most common in the world after trawl fishing. The processes of pursing and seine sampling can significantly affect the stability of a fishing vessel (seiner). In this paper, the influence of forces acting from the fishing gear on the roll angle is considered. The calculation algorithm is given, taking into account the coordinates of the point of application of the tension force of the cable going to the fishing gear, the angles of inclination of the cable, the magnitude of the force. Calculated dependences for roll processes are compiled, expressions for the angle of inclination of the vessel's hull are obtained. Examples of calculations are given. In particular, the change in the roll angle from the traction force, the lifting height of the snatch-block for a fishing vessel is considered. The calculations carried out indicate sufficient accuracy for engineering calculations and the possibility of using the above algorithm for evaluation calculations at various stages of design. It is important to take into account the possibility of simultaneous imposition of wind loads, the action of waves on the hull of the vessel. In these cases, the roll and trim will increase. Therefore, the specifics of fishing vessels is the need to take into account the behavior of the vessel during fishing operations.

Key words: purse seine tie rope sampling, fishing vessel roll, purse fishing, tractive effort, heeling moment.

Введение

Остойчивость судов является важным фактором, влияющим как на безопасность мореплавания, так и на технико-экономические показатели их работы [1–8].

На остойчивость промысловых судов кроме природных факторов (сила ветра, высота волн и др.) дополнительное влияние оказывают силы, действующие со стороны орудий лова [9, 10]. Как показали исследования [11, 12] статические углы крена рыболовных судов могут достигать до 4°, а динамические — 13°.

Характер и степень влияния орудий лова различна для разных видов лова — тралового, кошелькового, ярусного и др. Это связано с тем, что величина силы выборки орудий лова и точки её приложения к корпусу судна различны для всех видов лова. Например, тяговое усилие выборки

трала может изменяться в диапазоне от $20 \cdot 10^3$ Н до $150 \cdot 10^3$ Н, тяговое усилие выборки стяжного троса кошелькового невода — от $10 \cdot 10^3$ Н до $80 \cdot 10^3$ Н.

Так сила выборки трала при кормовой схеме траления преимущественно вызывает дифферент рыболовного судна на корму, который уравнивается всем весом судна.

Наиболее негативное влияние на остойчивость рыболовных судов вызывает процесс выборки стяжного троса при кошельковом лове [13]. В этом случае сила действует на борт судна и может совпадать по направлению с силой ветра, направлением действия волн и т.п. Кроме того, в отличие от тралового лова, где сила выборки трала действует практически на уровне палубы, при кошельковом лове сила выборки стяжного троса приложена к канифас-блоку, которая может быть расположена над палубой судна на 1,0...6,0 м. Это создает дополнительный кренящий момент.

В работах [14, 15] рассмотрен крен рыболовного судна (сейнера) при кошельковании, однако тяговое усилие стяжного троса неизвестно.

В данной статье рассматривается методика определения угла крена рыболовного судна при действии тягового усилия выборки стяжного троса кошелькового невода.

1. Расчетная схема

При составлении расчетной схемы процесса выборки стяжного троса кошелькового невода (рис. 1) по однобортной схеме воспользуемся методикой, предложенной в источниках [14, 16].

Для разработки математической модели примем три системы координат — XYZ и $X_1Y_1Z_1$ (жестко связанные с рыболовным судном), $X_2Y_2Z_2$ (жестко связанную с кошельковым неводом).

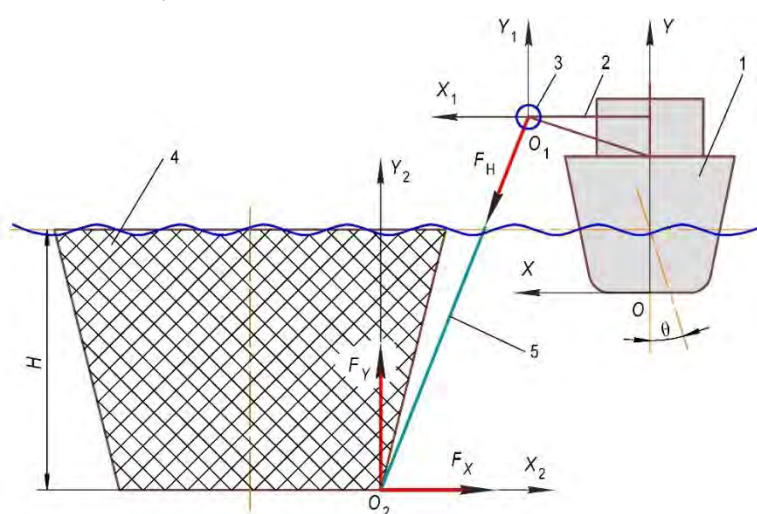


Рис. 1. Расчетная схема определения угла крена рыболовного судна в процессе кошелькования: 1 – рыболовное судно; 2 – грузовая стрела; 3 – канифас-блок; 4 – кошельковый невод; 5 – стяжной трос.

При этом ось кошелькового невода и ветвь стяжного троса O_2O_1 будут лежать в одной плоскости $X_2O_2Y_2$.

2. Математическая модель

Сила, действующая со стороны стяжного троса кошелькового невода в точке схода троса с канифас-блоком (точка O_1) при крене рыболовного судна определяется как

$$F_H = F_o + q[(y_{o1} - T) \cos \theta \cos \psi + H], \quad (1)$$

где F_o – сила натяжения стяжного троса на нижней подборе кошелькового невода; q – сила тяжести погонного метра стяжного троса в морской воде; H – высота кошелькового невода; y_{o1} – расстояние по оси OY до точки O_1 (ордината) схода троса с канифас-блоком (определяется высотой грузовой стрелы); T – осадка рыболовного судна без учета действия тягового усилия стяжного троса; θ и ψ – углы крена и дифферента рыболовного судна.

В качестве начала системы координат XYZ примем точку пересечения основной линии судна с мидель-шпангоутом. При этом направления осей следующие: ось OZ направлена к носу судна и совпадает с его основной линией; ось OX направлена на правый борт (к месту расположения канифас-блока); ось OY направлена вертикально вверх. В качестве начала системы координат $X_1Y_1Z_1$ примем точку O_1 приложения тягового усилия со стороны стяжного троса на канифас-блоке. Оси систем координат XYZ и $X_1Y_1Z_1$ параллельны друг другу и одинаково направлены. В качестве начала системы координат $X_2Y_2Z_2$ примем точку O_2 , расположенную на нижней подборе кошелькового невода.

Формулу (1) можно использовать при углах крена меньше 10° и углах дифферента до 2° . Тогда можно принять $\cos \theta \approx 1$ и $\cos \psi \approx 1$.

Силу натяжения стяжного троса от нижней подборе кошелькового невода можно найти как

$$F_o = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad (2)$$

где F_x – сила лобового сопротивления кошелькового невода; F_y – вертикальная гидродинамическая сила, создающая перегрузку невода.

При крене промыслового судна сила F_H раскладывается в точке O_1 системы координат $X_1Y_1Z_1$ на горизонтальную и вертикальную проекции, которые с учетом выражения (1) соответственно можно представить как:

$$F_{X1} = F_H \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 = F_x \sin \alpha_1; \quad (3)$$

$$F_{Y1} = -F_H \sin \alpha_1 = -\sqrt{F_H^2 - F_x^2}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – углы между направлением действия силы натяжения и осями O_1Y и O_1X соответственно.

Вертикальная составляющая силы натяжения стяжного троса вызывает дополнительное увеличение осадки корпуса рыболовного судна на величину

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{wS}, \quad (5)$$

где ΔV – объем дополнительно погруженной части корпуса судна; S – площадь ватерлинии судна; w – коэффициент отклонения бортов судна от ватерлинии.

$$\text{Введем обозначение } A = \sqrt{F_H^2 - F_x^2}. \quad (6)$$

Вследствие дополнительного погружения корпуса судна возникает дополнительная сила плавучести. Она приложена в центре тяжести дополнительно погруженного объема, противоположно направлена и равна по величине вертикальной проекции силы натяжения, т.е. $\Delta V\gamma = F_{Y1}$.

Тогда величину дополнительной осадки судна можно определить как

$$\Delta T = \frac{A}{w\gamma S}, \quad (7)$$

где γ – удельный вес морской воды.

Для малых углов крена судна восстанавливающий момент можно определить по формуле

$$M_\theta = D(h_0 + \Delta h)\sin\theta, \quad (8)$$

где D – нормальное водоизмещение судна, $D = \gamma V$; h_0 – исходная поперечная метацентрическая высота судна; Δh – изменение поперечной метацентрической высоты вследствие крена судна.

Изменение величины Δh можно найти используя метод аналогий для случая приема судном груза, величина которого составляет не более 10...15% от его нормального водоизмещения как

$$\Delta h = \frac{A}{D+A} \left(T + \frac{\Delta T}{2} - h_0 - y_{O1} \right). \quad (9)$$

Тогда с учетом (7) – (9) восстанавливающий момент можно найти как

$$M_\theta = D \left(h_0 + \frac{A}{D+A} \times \left[T - h_0 - y_{O1} + \frac{A}{2w\gamma S} \right] \right) \sin\theta. \quad (10)$$

Кренящий момент можно представить в виде

$$M_K = M_{K1} + M_{K2}, \quad (11)$$

где M_{K1} и M_{K2} – соответственно кренящие моменты от вертикальной и горизонтальной составляющих силы натяжения стяжного троса.

Составляющая кренящего момента M_{K1} равна

$$M_{K1} = \left[x_{O1} \cos\theta + \left(y_{O1} - T - \frac{\Delta T}{2} \right) \sin\theta \right] A, \quad (12)$$

где x_{O1} – расстояние по оси Ox до точки O_1 (абсцисса) схода троса с канифас-блока (определяется размерами грузовой стрелы).

Составляющая кренящего момента M_{K2} равна

$$M_{K2} = F_x \sin\alpha_1 [(y_{O1} - T) \cos\theta - x_{O1} \sin\theta]. \quad (13)$$

Принимая во внимание выражения (5), (11) – (13) кренящий момент можно найти по зависимости

$$M_K = A \left[x_{O1} \cos\theta + \left(y_{O1} - T - \frac{A}{2w\gamma S} \right) \times \sin\theta \right] + F_x [(y_{O1} - T) \cos\theta - x_{O1} \sin\theta] \sin\alpha_2. \quad (14)$$

$$\text{Введем обозначение } B = \frac{A}{2w\gamma S}. \quad (15)$$

Принимая во внимание выражения (10) и (12)–(15) и что при малых углах крена $\cos\theta \approx \theta$ математическую зависимость для определения угла статического крена от действия силы натяжения стяжного троса кошелькового невода можно записать

$$\theta = \left[x_{O1} A + F_x \sin\alpha_2 (y_{O1} - T) \right] \times \left[D \left(h_0 + \frac{A}{D+A} \right) (T + B - h_0 - y_{O1}) + F_x x_{O1} \sin\alpha_2 - A(y_{O1} - T - B) \right]^{-1}. \quad (16)$$

Следует отметить, что математическая зависимость (16) может быть использована при соотношении сил F_H и F_x в диапазоне $(F_H/F_x) \geq 1,0$.

Для определения величины динамического крена (мгновенного приложения нагрузки) нужно приравнять работы, выполняемые кренящим и восстанавливающим моментами (10) и (14)

$$\int_0^\theta M_{KP} d\theta = \int_0^\theta M_\theta d\theta. \quad (17)$$

Из (17) получим величину динамического угла крена $\theta_D = 2\theta$.

3. Результаты расчетов и дискуссия

Полученные зависимости (1)–(16) являются математической моделью для расчета угла крена рыболовного судна в любой момент процесса кошелькования с учетом характеристик судна и орудий лова (кошелькового невода).

Характер изменения угла крена судна в зависимости от силы натяжения стяжного троса кошелькового невода, представлен на рис. 2.

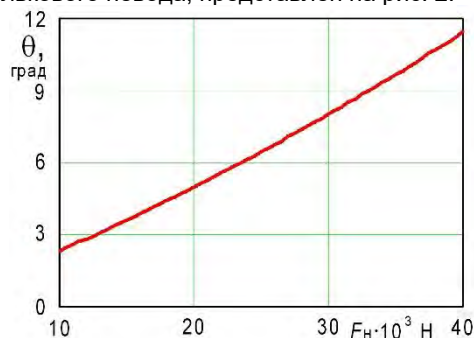


Рис. 2. Изменение угла крена от тягового усилия.

Как видно из полученных результатов при увеличении силы тяги с $10 \cdot 10^3$ до $40 \cdot 10^3$ Н (в 4 раза) угол крена увеличивается по зависимости близкой к линейной в 4,9 раза.

Характер изменения угла крена судна в зависимости от высоты подъема канифас-блока (ордината точки O_1) представлен на рис. 3.

Как видно из полученных результатов при увеличении высоты подъема канифас-блока с 3 до 6

м (в 2 раза) угол крена увеличивается по линейной зависимости в 3,1...3,3 раза.

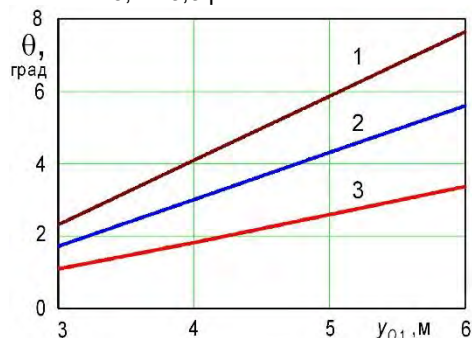


Рис. 3. Изменение угла крена от высоты подъема канифас-блока: 1 – $30 \cdot 10^3$ Н; 2 – $20 \cdot 10^3$ Н; 3 – $10 \cdot 10^3$ Н.

Расчеты проведены для рыболовного судна типа СЧС-150 со следующими параметрами: водоизмещение $D = 963 \cdot 10^3$ Н; средняя теоретическая осадка $H = 1,88$ м; площадь грузовой ватерлинии $S = 89,9$ м²; поперечная метацентрическая высота $h_0 = 0,69$ м; номинальные координаты расположения канифас-блока $x_{o1} = 2,8$ м

и $y_{o1} = 4,0$ м (зависит от вылета грузовой стрелы).

Кошельковый невод имеет длину 700 м и высоту 197 м. Стяжной трос был выполнен из каната, для которого сила тяжести в морской воде одного погонного метра $q = 0,25$ Н.

Вид графика функциональных зависимостей между исследуемыми параметрами определяется тем, что предложенная математическая модель основана на линейной схеме [17] в виду небольших углов крена.

Заключение

Разработаны математическая модель и расчетные зависимости (16) и (17), которые можно использовать для определения угла крена рыболовного судна в любой момент процесса кошелькования и выборки улова.

Полученные результаты позволяют повысить точность и достоверность оценки условий безопасной выборки (с точки зрения обеспечения остойчивости рыболовного судна) кошелькового невода.

Показано, что угол крена при мгновенном приложении силы натяжения в два раза больше, чем в случае статического приложения.

Литература

1. Grinnaert F., Billard J.Y., Laurens J.M. KGmax curves associated with second generation intact stability criteria for different types of ships // Journal of marine science and application. 2016. V.15. Pp. 223-235.
2. Wawrzynski W., Krata P. On ship roll resonance frequency // Ocean engineering. 2016. V.126. Pp. 92-114.
3. Souto-Iglesias A., Mata-Álvarez-Santullano F. Fishing effort control policies and ship stability: Analysis of a string of accidents in Spain in the period 2004–2007 // Marine policy. 2013. V.40. Pp. 10-17.
4. Haddara M.R., Wishahy M., Wu X. Assessment of ships transverse stability at sea // Ocean engineering. 1994. V.21(8). Pp.781-800.
5. Суслов А.Н., Сунь Т., Одегова О.В. О подходах к созданию системы автоматизированного мониторинга остойчивости судна // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1-3(47). С. 72-74.
6. Борисов Р.В., Кутейников М.А., Лузянин А.А., Самойлов В.Р. Об определении нагрузки на судно от нерегулярного ветра при нормировании остойчивости судов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. № 48-49. С. 70-76.
7. Шауб П.А., Московкина С.В. Динамическая оценка опрокидывания аварийного судна в штормовых условиях при наличии крена // Морской вестник. 2018. №1(65). С. 110-111.
8. Афремов А.Ш., Зайцев О.А., Сафронов К.С. Пути снижения крена на циркуляции судна с обводами типа «Моноклин» // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2015. №88(372). С. 29-40.
9. Ucer E. Examination of the transverse stability of fishing vessels by residual energy // Proceedings 14th International congress of the International-Maritime-Association-of-the-Mediterranean (IMAM). 13-16 September 2011. Genova, Italy. Pp. 151-156.
10. Зьонг В.Т. Исследование характеристик остойчивости современных среднетоннажных рыболовных судов наливного типа // Известия КГТУ. 2019. №54. С. 178-186.
11. Machii T., Nose Y. Comparisons on pursing drag of a Peruvian small purse seine // Nippon suisan gakkaiishi. 1990. V.56(5). Pp.719-723.
12. Machii T., Malpica O. Stability of Peruvian small wooden purse seiner // Journal of the Tokyo university of fisheries. 1988. V.75(2). Pp. 295-309.
13. Великанов Н.Л., Шарков О.В. Математическая модель погружения нижней подборы кошелькового невода на рабочую глубину // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №.4-2(50). С. 147–152.
14. Ананьев Д.М., Набиканова Н.В., Нечаев Ю.И., Севастьянов Н.Б. Моряку об остойчивости. Калининград: Калининградское книжное издательство, 1972. 224 с.
15. Раков А.И. Эксплуатационные требования к выбору формы обводов, дифферентовки и остойчивости сейнеров. Москва: ВНИРО, 1958. 84 с.
16. Великанов Н.Л. Механика кошелькового лова рыбы. Калининград: КГТУ, 2001. 166 с.
17. Алиев А.В., Мищенко О.В. Математическое моделирование в технике. Издательство «Институт компьютерных исследований»: Ижевск. 2012. 476 с.

References

1. Grinnaert F., Billard J.Y., Laurens J.M. KGmax curves associated with second generation intact stability criteria for different types of ships. Journal of marine science and application. 2016. V.15. Pp. 223-235.

2. Wawrzynski W., Krata P. On ship roll resonance frequency. Ocean engineering. 2016. V.126. Pp. 92-114.
3. Souto-Iglesias A., Mata-Álvarez-Santullano F. Fishing effort control policies and ship stability: Analysis of a string of accidents in Spain in the period 2004–2007. Marine policy. 2013. V.40. Pp. 10-17.
4. Haddara M.R., Wishahy M., Wu X. Assessment of ships transverse stability at sea. Ocean engineering. 1994. V.21(8). Pp. 781-800.
5. Suslov A.N., Sun T., Odegova O.V. O podhodah k sozdaniyu sistemy avtomatizirovannogo monitoringa ostoichivosti sudna [Approaches for the stability automation monitoring creation] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. V.1-3. Pp. 72-74.
6. Borisov R.V., Kuteynikov M.A., Luzyanin A.A., Samoilov V.R. Ob opredelenii nagruzki na sudno ot nereguljarnogo vetra pri normirovanii ostoichivosti sudov [On determining the load on the vessel from irregular wind when normalizing the stability of ships] Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2017. No 48-49. Pp. 70-76.
7. Shaub P.A., Moskovkina S.V. Dinamicheskaja ocenka oprokidyvaniya avariynogo sudna v shtormovyh uslovijah pri nalichii krena [Dynamic assessment of the capsizing of an emergency vessel in stormy conditions in the presence of a roll] Morskoj vestnik. 2018. No1(65). Pp. 110-111.
8. Afremov A.SH., Zaitsev O.A., Safronov K.S. Puti snizhenija krena na cirkuljacii sudna s obvodami tipa «Monoklin» [Ways to reduce the roll on the circulation of a vessel with contours of the «Monoclin» type] Trudy Central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika A.N. Krylova. 2015. No88(372). Pp. 29-40.
9. Ucer, E. Examination of the transverse stability of fishing vessels by residual energy. Proceedings 14th International congress of the International-Maritime-Association-of-the-Mediterranean (IMAM). 13-16 September 2011. Genova, Italy. Pp. 151-156.
10. Zuong V.T. Issledovanie harakteristik ostoichivosti sovremennyh srednetonnazhnyh rybolovnyh sudov nalivnogo tipa [Investigation of stability characteristics of modern medium-tonnage fishing vessels of liquid type] Izvestija KGTU. 2019. No54. Pp. 178-186.
11. Machii T., Nose Y. Comparisons on pursing drag of a Peruvian small purse seine. Nippon suisan gakkaiishi. 1990. V.56(5). Pp. 719-723.
12. Machii T., Malpica O. Stability of Peruvian small wooden purse seiner. Journal of the Tokyo university of fisheries. 1988. V.75(2). Pp. 295-309.
13. Velikanov N.L., Sharkov O.V. Matematicheskaja model' pogruzenija nizhnej podbory koshel'kovogo nevoda na rabochuju glubinu [Mathematical model of immersion of the purse seine bottom rope to the working depth] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. V.4-2. Pp. 147–152.
14. Ananyev D.M., Nabikanova N.V., Nechaev Yu.I., Sevastyanov N.B. Morjaku ob ostoichivosti [To the seaman about stability] Kaliningrad: Kaliningradskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1972. 224 p.
15. Rakov A.I. Jekspluatacionnye trebovanija k vyboru formy obvodov, differentovki i ostoichivosti sejnerov [Operational requirements for the choice of the shape of contours, trim and stability of seiners] Moskva: VNIRO, 1958. 84 p.
16. Velikanov N.L. Mehanika koshel'kovogo lova ryby [Mechanics of purse-line fishing] Kaliningrad: KGTU, 2001. 166 p.
17. Aliev A.V., Mishchenkova O.V. Matematicheskoe modelirovanie v tehnike [Mathematical modeling in engineering] Izdatel'stvo «Institut komp'juternyh issledovanij»: Izhevsk. 2012. 476 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: monolit8@yandex.ru.

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

Олег Васильевич Шарков, Олег Васильевич Шарков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории механизмов и машин и деталей машин, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: o_sharkov@mail.ru.

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

Nikolay L. Velikanov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of water resources and water use, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av., 1, e-mail: monolit8@yandex.ru.

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

Oleg V. Sharkov, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of the Department of theory of mechanisms and machines and machine parts, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av., 1, e-mail: o_sharkov@mail.ru.

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

Поступила в редакцию: 15.08.2021
Принята к публикации: 30.10.2021

УДК 621.396.67

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.023>

Подход к оценке взаимных сопротивлений вибраторов в конструкции логопериодической антенны двойной поляризации

Е.В. Волхонская¹, e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru Е.В. Коротей¹, e-mail: eugeny_korotey@mail.ru
К.В. Власова¹, e-mail: p_ksenia@mail.ru

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»

Аннотация. В данной работе приведены результаты теоретического исследования взаимного влияния двух вибраторов, произвольно ориентированных в пространстве. Авторы на основе метода наведенных ЭДС определили касательную составляющую электрического поля, создаваемого одним из вибраторов в месте расположения второго. С использованием данного выражения авторы предложили три способа оценки взаимного сопротивления системы двух скрещенных симметричных вибраторов. Сравнив способы по точности вычислений и затрачиваемому машинному времени, авторы выделили один из предложенных способов для проведения модельных исследований. Особенностью предложенного способа является возможность обобщения расчетного выражения не только для случая скрещенных вибраторов, но и для случаев вибраторов, расположенных в параллельных плоскостях и перпендикулярных одной и той же прямой. Поскольку указанные случаи охватывают все возможные варианты взаимной ориентации вибраторов в конструкции логопериодической антенны двойной поляризации, то предложенный подход может быть использован при проведении модельных исследований направленных свойств логопериодической антенны и оценки уровня кросс-поляризации.

Ключевые слова: логопериодическая антенна двойной поляризации, метод наведенных ЭДС, симметричный вибратор, скрещенные вибраторы, взаимное сопротивление.

An approach to the evaluation of mutual resistances of vibrators in the construction of a logoperiodic antenna of double polarization

Elena V. Volkhonskaya¹, e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru Evgeniy V. Korotey¹, e-mail: eugeny_korotey@mail.ru
Ksenia V. Vlasova¹, e-mail: p_ksenia@mail.ru

¹Baltic state academy of the fishery fleet, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. The results of two arbitrarily oriented in space vibrators mutual influence theoretical study are presents in this paper. Based on the method of induced EMF, the authors determined the tangential component of the electric field created by one of the vibrators at the location of the second one. Using this expression, the authors proposed three ways to evaluate the mutual resistance of a system of two crossed symmetrical vibrators. Comparing the methods by the accuracy of calculations and the machine time spent, the authors identified one of the proposed methods for conducting model studies. A feature of the proposed method is the possibility of generalizing the calculated expression not only for the case of crossed vibrators, but also for the cases of vibrators located in parallel planes and perpendicular to the same straight line. Since these cases cover all possible variants of mutual orientation of vibrators in the construction of a logoperiodic antenna of double polarization, the proposed approach can be used in conducting model studies of directional properties of a logoperiodic antenna and assessing the level of cross-polarization.

Key words: logoperiodic antenna of double polarization, induced EMF method, symmetrical vibrator, crossed vibrators, mutual resistance.

Введение

Антенны зеркального типа входят в состав антенных систем наземного сегмента различных систем спутниковой связи и навигации, осуществляющих мониторинг водных биологических ресурсов, наблюдение и контроль за деятельностью промысловых судов и пр. Развитие таких систем связи предполагает освоение новых частотных диапазонов и увеличение пропускной способности каналов связи при снижении излучаемой терминалами мощности [1].

В системах спутниковой связи и вещания существует практика многократного использования имеющейся полосы частот. Это осуществляется, либо за счет пространственного разноса лучей, либо за счет развязки по поляризации. В первом случае работа ведется в одних и тех же полосах частот при использовании спутниковых антенн, соединенных с различными ретрансляторами и имеющих направленные и разнесенные в пространстве лучи, а во втором – передача ведется в одних и тех же полосах частот через спутниковые антенны,

связанные с разными ретрансляторами радиочастотных сигналов с двумя ортогональными поляризациями.

Логопериодические и рупорные антенны находят широкое применение в качестве облучателей зеркальных антенн наземного сектора систем спутниковой связи при решении задач спутниковой связи и навигации, наблюдения и контроля за деятельностью промысловых судов и пр.

Конструкция логопериодических антенн [1] предполагает прием волн, либо горизонтальной, либо вертикальной поляризации, в зависимости от ориентации плоскости, содержащей излучающие элементы, относительно плоскости земли. В общем случае волна может иметь составляющие с обоими типами поляризации, то есть иметь круговую (в общем случае вращающуюся) поляризацию [2].

Для приема волн с круговой поляризацией могут использоваться специальные рупорные или логопериодические антенны двойной поляризации. Круг применений таких антенн достаточно широк – от испытаний на электромагнитную совместимость до мониторинга и разнообразных измерений. Данные

способности антенн с двойной поляризацией нашли применение в электронике, медицине, автомобильной промышленности, оборонной промышленности и других отраслях.

Конструкция облучателя зеркальной антенны должна не только обеспечивать возможность приема волн горизонтальной и вертикальной поляризации, но и обеспечивать характеристики всей антенной системы, удовлетворяющие требованиям к ним [7]. Одним из важных вопросов в данном случае является обеспечение кросс-поляризационной развязки между каналами приема волн с вертикальной и горизонтальной поляризациями.

Для решения данного вопроса на стадии проектирования важным является исследование взаимного влияния излучающих элементов, отвечающих за прием волн различной поляризации.

1. Анализ конструктивных особенностей антенн и их технических характеристик

Чешским производителем RFSpin выпускается целый модельный ряд антенн двойной поляризации, представляющих собой рупорные 4-х гребневые антенн типа QRH (рис. 1) и логопериодические антенны типа DLPP [3].

Рупорные антенны RFSpin [4] функционируют в диапазоне длин волн от 300 МГц до 50 ГГц с коэффициентами перекрытия от 10 до 15. Максимальный коэффициент стоячей волны (КСВ) в питающем фидере составляет от 2,5 до 2,1 в зависимости от диапазона, коэффициент усиления (КУ) – от 4 до 15,5 дБи, ширина диаграммы направленности (ДН) по уровню -3 дБ составляет от 90° до 160° в низкочастотной области обозначенного диапазона частот до 15°-30° в его высокочастотной части, кросс-поляризационная развязка составляет от -20 до -50 дБ.



Рис. 1. Рупорная четырехгребневая антенна

Логопериодическая антенна двойной поляризации функционирует в диапазоне частот от 500 МГц до 6 ГГц, имеет максимальный КСВ в питающем фидере 2,5, обладает КУ 4-7 дБи, соотношение между уровнями излучения вперед и назад составляет более 20 дБ. Ширина ДН составляет от 40° до 70° в плоскости Н (содержит излучающие элементы) и от 60° до 120° в плоскости Е (перпендикулярна излучающим элементам).

Аналогичные по свойствам логопериодические антенны (рис. 2) выпускает компания Rohde-Schwarz

[5]. Данные антенны функционируют в диапазоне от 1 до 18 ГГц и обеспечивают для зеркальной антенны с диаметром рефлектора 3 метра коэффициент усиления от 26,5 до 50 дБи, ширину ДН от 6° до 0,35° в зависимости от значения рабочей частоты [6].



Рис. 2. Логопериодическая антенна двойной поляризации

2. Постановка задачи

Конструкция облучателя зеркальной антенны должна не только обеспечивать возможность приема волн горизонтальной и вертикальной поляризации, но и обеспечивать характеристики всей антенной системы, удовлетворяющие требованиям к ним [7]. Одним из важных вопросов в данном случае является обеспечение кросс-поляризационной развязки между каналами приема волн с вертикальной и горизонтальной поляризациями.

Для решения данного вопроса на стадии проектирования важным является исследование взаимного влияния излучающих элементов, отвечающих за прием волн различной поляризации.

В данной работе на основе метода наведенных ЭДС предложен подход к оценке взаимных сопротивлений вибраторов в конструкции логопериодической антенны двойной поляризации.

3. Математическая модель поля излучения одиночного вибратора

В случае произвольной взаимной ориентации двух вибраторов в пространстве (рис. 3) взаимное сопротивление двух вибраторов определяется касательной составляющей электрического поля, создаваемого одним из них в месте расположения другого.

Величина данной компоненты электрического поля определяется выражением вида:

$$E_{\tau} = -i \frac{30}{k} \int_0^{l_1} I(z) \hat{T} \Psi(r) dz, \quad (1)$$

где введены обозначения

$$\hat{T} = \cos(\alpha) \left(\frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + k^2 \right) + \sin(\alpha) \frac{\partial^2}{\partial \eta \partial \xi},$$

$$\Psi(r) = \frac{e^{-ikr}}{r}, \quad r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + (\eta - z)^2},$$

i – мнимая единица, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, l_1 – длина вибратора, $I(z)$ – амплитудное распределение тока вдоль вибратора,

α – угол, задающий взаимную ориентацию вибраторов (рис. 1).

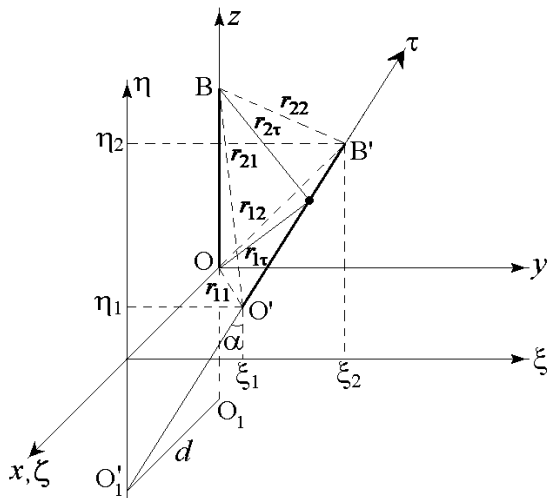


Рис. 3. Два произвольно ориентированных в пространстве вибратора

В случае гармонического распределения тока

$$I(z) = I_{1m} \sin(k(l_1 - z)), \quad (2)$$

и величина касательной составляющей электрического поля состоит из четырех компонент

$$E_\tau = E_{\tau 1} + E_{\tau 2} + E_{\tau 3} + E_{\tau 4}, \quad (3)$$

где

$$E_{\tau 1} = i \frac{30}{k} I_{1m} \sin(k(l_1 - z)) \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) \Big|_0^{l_1},$$

$$E_{\tau 2} = -i 30 I_{1m} \cos(k(l_1 - z)) \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) \Big|_0^{l_1} \cos(\alpha),$$

$$E_{\tau 3} = -i \frac{30 \xi \cdot I_{1m} \sin(\alpha) e^{-ikr_{1\tau}}}{d^2 + \xi^2} \left(\frac{\eta}{r_{1\tau}} \cos(kl_1) + i \cdot \sin(kl_1) \right),$$

$$E_{\tau 4} = -i \frac{30 \xi \cdot I_{1m} \sin(\alpha) e^{-ikr_{2\tau}}}{d^2 + \xi^2} \cdot \frac{l_1 - \eta}{r_{2\tau}},$$

а также введены расстояния от концов рассматриваемого вибратора до точки наблюдения на поверхности второго вибратора

$$r_{1\tau} = \sqrt{d^2 + \xi^2 + \eta^2}, \quad r_{2\tau} = \sqrt{d^2 + \xi^2 + (\eta - l_1)^2}. \quad (4)$$

4. Оценка взаимного сопротивления вибраторов

Величина взаимного сопротивления двух вибраторов может быть определена следующим образом:

$$Z_{ВЗ} = - \int_0^{l_2} E_\tau I^*(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $I(\tau) = I_{2m} \sin(k(l_2 - \tau))$ – амплитудное распределение тока во втором вибраторе.

Первое из слагаемых в выражении (3) определяет вклад в сопротивление излучения так называемых концевых токов и в случае их нулевого значения может не учитываться. Оно также не оказывает влияния на общее сопротивление и в большинстве

практических случаев и должно учитываться только при соединении вибратора с неизлучающим проводящим элементом [8].

Если выполнить подстановку (3) в (5), то выражение для взаимного сопротивления вибраторов можно привести к виду:

$$Z_{ВЗ} = Z_{ВЗ1} + Z_{ВЗ2}, \quad (6)$$

где $Z_{ВЗ1}$ – вклад во взаимное сопротивление от концевых токов

$$Z_{ВЗ1} = -i 30 I(z) I^*(\tau) \frac{e^{-ikr}}{r} \Big|_{OO'}^{BB'}, \quad (7)$$

где

$$r_{BB'} = r_{22} = \sqrt{d^2 + \xi_2^2 + (\eta_2 - l_1)^2},$$

$$r_{BO'} = r_{21} = \sqrt{d^2 + \xi_1^2 + (\eta_1 - l_1)^2},$$

$$r_{OB'} = r_{12} = \sqrt{d^2 + \xi_2^2 + \eta_2^2}, \quad r_{OO'} = r_{11} = \sqrt{d^2 + \xi_1^2 + \eta_1^2},$$

причем для пар точек (B, B') и (O, O') слагаемое в (7) берется со знаком «+», а для пар точек (B, O') – со знаком «-», а $Z_{ВЗ2}$ – вклад от прочих слагаемых в выражении (3)

$$Z_{ВЗ2} = \frac{15 I_{1m} I_{2m}}{2} \{ F_1 \cdot e_+^* + F_3 \cdot e_+ + F_2 \cdot e_-^* + F_4 \cdot e_- \}, \quad (8)$$

где введены обозначения

$$e_+ = e^{ik(l_2 + l_1)}, \quad e_- = e^{ik(l_2 - l_1)},$$

$$F_1 = (J_{11} + J_{12}) - e^{ikl_1} (J_{13} + J_{14}),$$

$$F_2 = (J_{21} + J_{22}) - e^{-ikl_1} (J_{23} + J_{24}),$$

$$F_3 = (J_{31} + J_{32}) - e^{-ikl_1} (J_{33} + J_{34}),$$

$$F_4 = (J_{41} + J_{42}) - e^{ikl_1} (J_{43} + J_{44}),$$

а интегралы, входящие в данное выражение, имеют вид

$$J_{11} = \int_{r_{11}}^{r_{12} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_{10}} dt, \quad J_{12} = \int_{r_{11}}^{r_{12} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_{10}^*} dt,$$

$$J_{13} = \int_{r_{21}}^{r_{22} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_1} dt, \quad J_{14} = \int_{r_{11}}^{r_{12} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_1^*} dt,$$

$$J_{21} = \int_{r_{11}}^{r_{12} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_{20}} dt, \quad J_{22} = \int_{r_{11}}^{r_{12} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_{20}^*} dt,$$

$$J_{23} = \int_{r_{21}}^{r_{22} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_2} dt, \quad J_{24} = \int_{r_{11}}^{r_{12} - l_2} \frac{e^{-ikt}}{t - t_2^*} dt,$$

$$J_{31} = \int_{r_{11}}^{r_{12} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_{10}} dt, \quad J_{32} = \int_{r_{11}}^{r_{12} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_{10}^*} dt,$$

$$J_{33} = \int_{r_{21}}^{r_{22} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_1} dt, \quad J_{34} = \int_{r_{11}}^{r_{12} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_1^*} dt,$$

$$J_{41} = \int_{r_{11}}^{r_{12} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_{20}} dt, \quad J_{42} = \int_{r_{11}}^{r_{12} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_{20}^*} dt,$$

$$J_{43} = \int_{r_{21}}^{r_{22} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_2} dt, \quad J_{44} = \int_{r_{11}}^{r_{12} + l_2} \frac{e^{-ikt}}{t + t_2^*} dt,$$

где

$$t_1 = \frac{(\xi_1 - i \cdot d)(1 + \cos(\alpha)) - (\eta_1 - l_1)\sin(\alpha)}{\sin(\alpha)},$$

$$t_2 = \frac{(\xi_1 - i \cdot d)(1 - \cos(\alpha)) + (\eta_1 - l_1)\sin(\alpha)}{\sin(\alpha)},$$

$$t_{10} = \frac{(\xi_1 - i \cdot d)(1 + \cos(\alpha)) - \eta_1 \sin(\alpha)}{\sin(\alpha)},$$

$$t_{20} = \frac{(\xi_1 - i \cdot d)(1 - \cos(\alpha)) + \eta_1 \sin(\alpha)}{\sin(\alpha)}.$$

Входящие в данное выражение интегралы могут быть вычислены с использованием интегральных косинуса и синуса:

$$Z_{B32} = R_{B3} + i \cdot X_{B3}, \quad (9)$$

где

$$R_{B3} = P_1 \cdot c_+ + P_2 \cdot s_+ + P_3 \cdot c_- + P_4 \cdot s_- \quad (10)$$

$$X_{B3} = Q_1 \cdot c_+ + Q_2 \cdot s_+ + Q_3 \cdot c_- + Q_4 \cdot s_-, \quad (11)$$

$$c_+ = \cos(k(l_2 + l_1)), \quad s_+ = \sin(k(l_2 + l_1)),$$

$$c_- = \cos(k(l_2 - l_1)), \quad s_- = \sin(k(l_2 - l_1)),$$

$$P_1 = Ci(2kl_1) + Ci(2kl_2) - Ci(kr_1) - Ci(kr_2) + \ln\left(\frac{1 + \cos(\alpha)}{2}\right),$$

$$P_2 = Si(2kl_1) + Si(2kl_2) - Si(kr_1) + Si(kr_2),$$

$$P_3 = Ci(kr_3) + Ci(kr_4) - Ci(2kl_1) - Ci(2kl_2) - \ln\left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{2}\right),$$

$$P_4 = Si(kr_3) - Si(kr_4) + Si(2kl_1) - Si(2kl_2),$$

$$Q_1 = Si(kr_1) + Si(kr_2) - Si(2kl_1) - Si(2kl_2),$$

$$Q_2 = Ci(2kl_1) + Ci(2kl_2) - Ci(kr_1) + Ci(kr_2) + \ln\left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{k^2 \xi_1^2 (1 + \cos(\alpha))(1 + \sin(\alpha))}\right),$$

$$Q_3 = Si(2kl_1) + Si(2kl_2) - Si(kr_3) - Si(kr_4),$$

$$Q_4 = Ci(2kl_1) - Ci(2kl_2) + Ci(kr_3) - Ci(kr_4) + \ln\left(\frac{1}{1 + \sin(\alpha)}\right),$$

а также введены обозначения

$$r_1 = r_{22} + l_1 + l_2, \quad r_2 = r_{22} - l_1 - l_2,$$

$$r_3 = r_{22} - l_1 + l_2, \quad r_4 = r_{22} + l_1 - l_2.$$

Выражения, полученные авторами данной статьи, практически полностью повторяют результаты [8], за исключением нескольких опечаток, обнаруженных в изученной ими работе. Однако исправление данных опечаток являлось необходимым для возможности проведения адекватным модельных исследований.

5. Модельные исследования

Поскольку логопериодическая антенна при больших коэффициентах усиления и перекрытия рабочего диапазона частот может содержать достаточно большое количество вибраторов, то важным вопросом при проведении модельных исследований является точность и скорость вычислений.

Взаимное сопротивление скрещенных вибраторов может быть вычислено тремя способами: – с использованием выражений (3)-(5) (способ 1); – с использованием выражений (6)-(8) (способ 2); – с использованием выражений (9)-(11) (способ 3).

На рис.4 представлены результаты вычислений по данным выражениям активной и реактивной частей несимметричных скрещенных вибраторов.

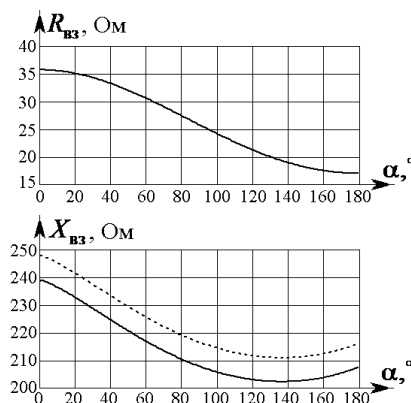


Рис. 4. Взаимное сопротивление скрещивающихся вибраторов с длинами $\lambda/4$ и $\lambda/6$

Из рис. 4 видно, что при вычислении активной части взаимного сопротивления все три способа дают один и тот же результат. Однако из того же рисунка видно, что при оценке реактивной части взаимного сопротивления результаты, полученные с помощью первого и второго способов (сплошная линия), отличаются от результатов, полученных с помощью третьего способа (пунктирная линия) на величину порядка 10 Ом. Это связано с тем, что при выводе формул (10)-(11) во всех вычислениях, кроме логарифма в коэффициенте при $\cos(k(l_2 + l_1))$, полагалось $\xi_1 = 0$. А значит, отдельные слагаемые в данном выражении вычислены с различной точностью. Таким образом, с целью повышения точности расчетов желательно пользоваться первым или вторым способом.

С другой стороны, все три способа требуют различного машинного времени для проведения вычислений. Использование встроенной функции среды MathCAD $time()$ позволило оценить время, затрачиваемое на построение графиков активной и реактивной составляющих взаимного сопротивления скрещенных вибраторов. При построении графика активной части взаимного сопротивления данное время составило 6.265, 1.137 и 0.327 секунд. При построении графика реактивной части взаимного сопротивления то же время составило 6.464, 1.189 и 0.333 секунд. Таким образом, расчет по выражению (9), хотя и имеет некоторую погрешность, но требует гораздо меньшего машинного времени (в 19,2 и 3,5 раза, соответственно), что является его несомненным преимуществом. Однако если необходимо найти компромисс между точностью и скоростью вычислений, то необходимо остановиться на втором способе, основанном на выражениях (6)-(8).

6. Направления дальнейших исследований

Если представить выражение (8) функцией параметров $(d, \xi_1, \alpha, l_1, l_2)$, то это позволит

унифицировать выражения для взаимного сопротивления вибраторов при для их различной ориентации.

Конструкция логопериодической антенны предполагает вычисление двух типов взаимных сопротивлений:

- между скрещенными вибраторами (рис. 5);
- между вибраторами, лежащими в параллельных плоскостях и перпендикулярных одной и той же прямой (рис. 6).

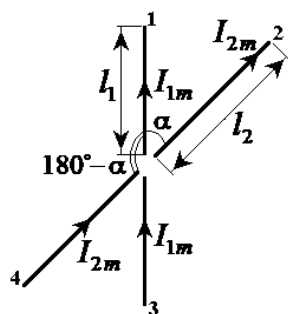


Рис. 5. Система скрещивающихся вибраторов

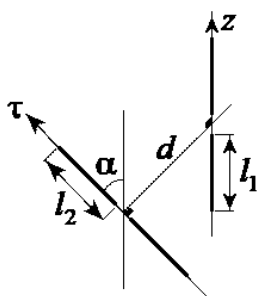


Рис. 6. Система вибраторов, расположенных в параллельных плоскостях

В обоих случаях взаимное сопротивление симметричных вибраторов может быть найдено следующим образом [8]:

$$R_{вз.общ} = 2(R_{вз} - R'_{вз}), X_{вз.общ} = 2(X_{вз} - X'_{вз}), \quad (12)$$

где $R_{вз}$ определяется вещественной частью выражения (6), $X_{вз}$ – мнимой частью выражения (6), а $R'_{вз}$ и $X'_{вз}$ получаются из них заменой α на $180^\circ - \alpha$. При этом при поиске взаимного сопротивления скрещенных вибраторов необходимо полагать $d = 0$, а для прочих случаев $d \neq 0$.

Построение зависимостей активной и реактивной частей взаимного сопротивления симметричных вибраторов от угла ориентации в соответствии с выражениями (12) дает результат, приведенный на рис. 7.

Из построенных зависимостей видно, что при перпендикулярном расположении скрещивающихся вибраторов ($\alpha=90^\circ$) обе части взаимного сопротивления обращаются в ноль. При отклонении взаимной ориентации скрещивающихся вибраторов от значения $\alpha=90^\circ$ обе части взаимного сопротивления перестают быть нулевыми. Так при угле между скрещивающимися вибраторами $\alpha=85^\circ$ активная и реактивная части входного сопротивления при увеличении относительной длины вибраторов совершают колебания, причем активная часть принимает значения, по модулю не

большие 20 Ом, а реактивная часть – не более 30 Ом (рис. 8).

Для резонансного симметричного вибратора длина плеча будет составлять порядка $0,25\lambda$ [9], и взаимное сопротивление скрещивающихся вибраторов будет иметь активную и реактивную части не более 10 Ом. Для более коротких вибраторов на данной частоте значение взаимного сопротивления будет еще меньше, а для более длинных может оказаться существенно большим.

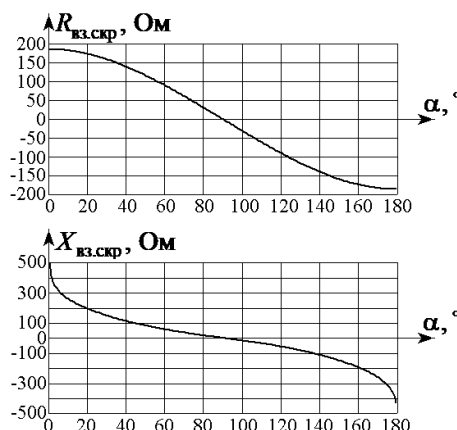


Рис. 7. Взаимное сопротивление скрещивающихся вибраторов с длинами плеч $3\lambda/8$

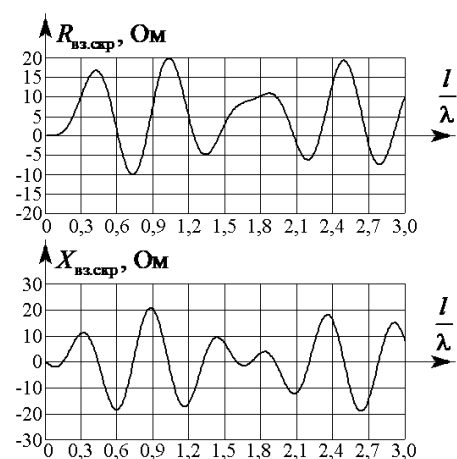


Рис. 8. Взаимное сопротивление скрещивающихся вибраторов с одинаковыми длинами плеч и углом взаимной ориентации $\alpha=85^\circ$

В качестве дальнейших исследований планируется провести моделирование амплитудной характеристики направленности и параметров излучения логопериодической антенны двойной поляризации (рис. 2) при изменении угла ориентации α и выяснить, при каких отклонениях α от 90° кросс-поляризация не превысит максимального допустимого значения.

Закключение

Таким образом, в результате проведенных теоретического и модельного исследований предложен подход к оценке взаимных сопротивлений вибраторов в конструкции логопериодической антенны двойной поляризации.

Дополнительная информация

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием на выполнение НИОКР «Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации», приказ № 69 от 04.03.2019 г., п.п. 1.19.

Литература

1. Ротхаммель, К. Антенны. Том 1. / Кришке А. // Пер. с нем. 11–е изд., исправ. М.: ДМК Пресс, 2012. 256 с.
2. Семенов, Н. А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов. М.: Связь, 1973. 480 с.
3. Каталог антенн RFSpin [Электронный ресурс]. – URL: https://sernia.ru/upload/pdf_files/katalog-antenn-rfspin.pdf (дата обращения 10.02.2021).
4. RFSpin // Обзор антенн двойной поляризации [Электронный ресурс]. – URL: <http://rfspin.ru/info/obzor-antenn-dvoynoi-polarizacii-id42> (дата обращения 10.02.2021).
5. ROHDE&SCHWARZ // R&S@HL024A1/S1 Antenna. Crossed Log-Periodic Antennas [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/hl024a1-s1-productstartpage_63493-9063.html (дата обращения 15.02.2021).
6. Направленная антенная система СВЧ диапазона 1-18 ГГц (с возможностью расширения до 40 ГГц) R&S@AC300 [Электронный ресурс]. – URL: https://radio.vilcom.ru/upload-files/antennye_ustroystva/izmeritelnye_antenny/rhode_schwarz/ac300/ac300_ti_ru.pdf (дата обращения 15.02.2021).
7. Фролов, О. П. Антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Радио и связь, 2008. 376 с.
8. Лавров, Г. А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М.: Связь, 1975. 128 с.
9. Айзенберг, Г. З. Коротковолновые антенны / Г. З. Айзенберг, С. П. Белоусов, Э. М. Журбенко и др.; под ред. Г. З. Айзенберга – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.

References

1. Rotkhammel', K. Antenny. [Antennas]. Tom 1. Krishke A. Per. s nem. 11–e izd., isprav. M.: DMK Press, 2012. 256 s.
2. Semenov, N. A. Tekhnicheskaya elektrodinamika [Technical electrodynamics]. Uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: Svyaz', 1973. 480 s.
3. Katalog antenn RFSpin [RFSpin Antenna Catalog]. [Elektronnyy resurs]. – URL: https://sernia.ru/upload/pdf_files/katalog-antenn-rfspin.pdf (data obrashcheniya 10.02.2021).
4. RFSpin. Obzor antenn dvoynoy polarizatsii [Dual Polarized Antennas Overview]. [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://rfspin.ru/info/obzor-antenn-dvoynoi-polarizacii-id42> (data obrashcheniya 10.02.2021).
5. ROHDE&SCHWARZ.R&S@HL024A1/S1 Antenna. Crossed Log-Periodic Antennas [Electronic resource]. – URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/hl024a1-s1-productstartpage_63493-9063.html (date of the application 15.02.2021).
6. Napravlennaya antennaya sistema SVCh diapazona 1-18 GGts (s vozmozhnost'yu rasshireniya do 40 GGts) R&S@AC300 [Directional antenna system microwave range 1-18 GHz (expandable to 40 GHz) R&S@AC300]. [Elektronnyy resurs]. – URL: https://radio.vilcom.ru/upload-files/antennye_ustroystva/izmeritelnye_antenny/rhode_schwarz/ac300/ac300_ti_ru.pdf (data obrashcheniya 15.02.2021).
7. Frolov, O. P. Antenny dlya zemnykh stantsiy sputnikovoy svyazi [Antennas for satellite earth stations]. M.: Radio i svyaz', 2008. 376 s.
8. Lavrov, G. A. Vzaimnoe vliyaniye lineynykh vibratornykh antenn [Mutual influence of linear dipole antennas]. M.: Svyaz', 1975. 128 s.
9. Ayzenberg, G. Z. Korotkovolnovyye anteny [Shortwave antennas]. G. Z. Ayzenberg, S. P. Belousov, E. M. Zhurbenko i dr.; pod red. G. Z. Ayzenberga. izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Radio i svyaz', 1985. 536 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Елена Вячеславовна Волхонская, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Elena V. Volkhonskaya, Dr. Sci. (Eng), the associate professor, the professor of department of ship radio engineering systems, Baltic state academy of the fishery fleet, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation, e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей, доцент кафедры судовых радиотехнических систем, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: eugeniy_korotey@mail.ru

Evgeniy V. Korotey, the associate professor of department of ship radio engineering systems, Baltic state academy of the fishery fleet, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation, e-mail: eugeniy_korotey@mail.ru

Ксения Валерьевна Власова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры судовых радиотехнических систем, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: p_ksenia@mail.ru

Ksenia V. Vlasova, Dr. Sci. (Phys & Math), the associate professor of department of ship radio engineering systems, Baltic state academy of the fishery fleet, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation, e-mail: p_ksenia@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2021
Принята к публикации: 23.11.2021

УДК 551.510.535

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.024>

Численное моделирование сильного воздействия на ионосферную плазму

В.В. Медведев¹, e-mail: vmedvedev2012@list.ru, В.Е. Еремичева¹, e-mail: viksik111@yandex.ru

А.Д. Колин¹, e-mail: yojik14@gmail.com

¹Калининградский технический университет

Аннотация. В работе представлены постановка задачи начальной стадии мощного антропогенного возмущения ионосферы для последующего вычисления высотно-временного распределения ионосферно-магнитосферных параметров. Данная задача имеет огромное значение в плане теоретического исследования таких возмущений на математических моделях изучаемой среды. Такие возмущения сопровождаются различными физико-химическими процессами, которые к настоящему времени плохо изучены. Основным источником сильных возмущений ионосферы являются мощные электромагнитные излучения (сильная солнечная вспышка, мощный ядерный взрыв). Такие электромагнитные возмущения могут вызывать сильнейшее глобальное перераспределение всей атмосферы Земли, которые к настоящему времени недостаточно надежно изучены, и одним из способов их изучения, является математическое моделирование. Приводятся результаты вычислительного эксперимента начальной стадии ионизации нейтрального газа, которые могут помочь в дальнейшем исследовании такого процесса.

Ключевые слова: ионосфера, вычисления, уравнения, математическая модель, температура, концентрация, электроны, ионы.

Numerical modeling of strong effects on ionospheric plasma

Vladimir V. Medvedev¹, e-mail: vmedvedev2012@list.ru, Viktorija E. Eremicheva¹, e-mail: viksik111@yandex.ru

Anton D. Kolin¹, e-mail: yojik14@gmail.com

¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. The paper presents the formulation of the problem of the initial stage of a powerful anthropogenic disturbance of the ionosphere for the subsequent calculation of the altitude-time distribution of the ionosphere-magnetospheric parameters. This problem is of great importance in terms of the theoretical study of such perturbations on mathematical models of the studied environment. Such disturbances are accompanied by various physicochemical processes, which are poorly understood by now. The main source of strong disturbances in the ionosphere are powerful electromagnetic radiation (strong solar flare, powerful nuclear explosion). Such electromagnetic disturbances can cause the strongest global redistribution of the entire atmosphere of the Earth, which by now have not been sufficiently studied reliably, and one of the ways to study them is mathematical modeling. The results of a computational experiment of the initial stage of ionization of a neutral gas are presented, which can help in further investigation of such a process.

Keywords: ionosphere, calculations, equations, mathematical model, temperature, concentration, electrons, ions.

Введение

Мощные ионосферные возмущения типа солнечных вспышек (сопровождающиеся сильными изменениями магнитного поля Земли и высыпанием энергетических частиц) вызывают значительные изменения как состава ионосферы, так и ее энергетики, что приводит к существенному нарушению радиосвязи для подводных и надводных аппаратов. В данной работе рассматриваются ионосферные возмущения в геофизических экспериментах подобных работам [1,2]. Как известно мощные возмущения в верхней атмосфере и ионосфере сопровождаются сложными физико-химическими процессами, которые недостаточно полно исследованы. Однако изучение этих явлений в натуральных экспериментах затруднено и очень дорогостояще. Поэтому математическое моделирование таких возмущений является наиболее надежным и менее затратным способом исследования этих явлений. В ранних работах [3,4] теоретические исследования этих процессов проводились в предположении гидродинамического распределения окружающей среды.

В настоящей работе представлены результаты вычислительного эксперимента мощного ионосферного возмущения, проведенного на основе полной самосогласованной математической модели, построенной авторами в [5-7].

Данная задача имеет огромное значение в плане теоретического исследования таких возмущений на математических моделях изучаемой среды.

Математическая модель

Основным источником сильных возмущений ионосферы являются мощные электромагнитные излучения. Такое возмущение сопровождается сильным нагревом атмосферы и ее ионизацией, которое можно описать формулой (1) ([3]).

Уравнение для температуры:

$$\frac{4 \cdot \sigma \cdot V}{c} \cdot T^4 + T \cdot \lambda + q(t) \cdot \beta = Q \quad (1)$$

где V – объем шара радиуса R ,

$\frac{4 \cdot \sigma \cdot V}{c}$ – плотность энергии,

$\beta = N_e/N$,

$\lambda = N_i/N$,

N_e , N_i , N – концентрации электронов, ионов, нейтралов,

Q – выделяемая энергия.

$q(t)$ – скорость ионизации, рассчитывается по формуле (2):

$$q(t) = G \cdot \frac{\tilde{w}_\gamma \cdot u_\gamma(t) \cdot \delta(h) \cdot \mu_{0\gamma}(\epsilon_\gamma, t) \cdot B(L(t)) \cdot e^{-L(t)}}{S \cdot u_i} \quad (2)$$

где $G = 2,63 \cdot 10^{21}$ Дж,

\tilde{w}_γ – заданная величина энергии возмущения (выраженная в кТ),

S – площадь поверхности шара,
 $u_\gamma(t) = A \cdot t^{-\nu}$,
 A и ν – const,
 $u=35$ – энергия одного акта ионизации,
 $L(t) = 10^5 \cdot \mu_\gamma(\varepsilon_\gamma, t) \cdot R \cdot \delta_c$,
 $\delta_c = \left| \frac{1}{H_0-h} \int_h^{H_0} \delta(h) dh \right|$,
 $R^2 = (R_0 + h)^2 + (R_0 + H_0)^2 - 2 \cdot (R_0 + h) \cdot (R_0 + H_0) \cdot \cos \theta(t)$,
 $\cos \theta(t) = \cos \left(\frac{r-v_0 t}{R_0} \right)$,
 $B(L(t)) = 1 + \alpha_1 L + \alpha_2 L^2$ – эмпирическая формула,
 H_0 – высота расположения источника возмущения,
 h – высота, где проходит расчет,
 r – заданное расстояние,
 R_0 – радиус Земли,
 R – расстояние от источника возмущения до точки наблюдения.

Для вычисления ионосферных параметров согласно модели [5-7] задаются необходимые начальные условия (3) для компонент ионного состава:

$$\begin{aligned} [O_2^+] &= [O_2^+]_{\text{фон}} + \gamma_{O_2^+} [e]_0, \\ [NO^+] &= [NO^+]_{\text{фон}} + \gamma_{NO^+} [e]_0, \\ [Cb_1^+] &= 0, [Cb_2^+] = 0, \\ [O_2^-] &= [O_2^-]_{\text{фон}}, \\ [X^-] &= 0, \\ [e^-] &= [e^-]_{\text{фон}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{O_2^+} &= \left\{ \delta_{O_2^+} + \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_2}{\sum R_{N_2^+}} + \delta_{N^+} \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_6} + \left(\delta_{O^+} + \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_3}{\sum R_{N_2^+}} \right) \cdot \frac{R_4 + R_7}{R_4 + R_7} \right\}, \\ \gamma_{NO^+} &= \left\{ \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_1}{\sum R_{N_2^+}} + \delta_{N^+} \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6} + \left(\delta_{O^+} + \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_3}{\sum R_{N_2^+}} \right) \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_7} \right\}, \\ \gamma_{N(^2D)} &= \delta_{N(^2D)} + \frac{\alpha_{N_2^+}^* [e]_0}{\sum R_{N_2^+}}, \quad \gamma_{O_2(^1\Delta_g)} = \delta_{O_2(^1\Delta_g)}, \quad \gamma_{O(^1D)} = \delta_{O(^1D)}, \\ \gamma_{N_2(A^3\varepsilon)} &= \delta_{N_2(A^3\varepsilon)}, \\ \gamma_{O(^3P)} &= \delta_{O^+} + \delta_{N^+} \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6} + \left(\delta_{O^+} + \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_3}{\sum R_{N_2^+}} \right) \cdot \frac{R_7}{R_4 + R_7}, \\ \gamma_{N(^4S)} &= \delta_{N^+} + \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_1 + \alpha_{N_2^+}^* [e]_0}{\sum R_{N_2^+}} + \delta_{N^+} \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_6} + \left(\delta_{O^+} + \delta_{N_2^+} \cdot \frac{R_3}{\sum R_{N_2^+}} \right) \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_7} \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sum R_{N_2^+} = R_1 + R_2 + R_3 + \alpha_{N_2^+}^* [e]_0$,
 $R_1 = 1,4 \cdot 10^{-10} [O]$,
 $R_2 = 6 \cdot 10^{-11} \left(\frac{300}{T} \right)^{\frac{1}{2}} [O_2]$,
 $R_3 = 10^{-11} [O]$,
 $R_4 = 3 \cdot 10^{-12} \exp(-3,14 \cdot 10^{-3} T) [N_2]$,

$R_5 = 6 \cdot 10^{-10} [O_2]$,
 $R_6 = 2 \cdot 10^{-10} [O_2]$,
 $R_7 = 3,3 \cdot 10^{-11} \exp(-1,69 \cdot 10^{-3} T) [O_2]$,
 $\alpha_{N_2^+} = 3 \cdot 10^{-7} (300/T)^{0,02}$,
 $[e]_0$ – значение электронной концентрации в начальный момент времени
 δ_j – доля частиц, образованных в одном акте.
 Значения концентрации $[O]$, $[O_2]$, $[N_2]$ рассчитывались по модели [6,7].

Пространственно-временное распределение этих компонентов с учётом вертикального переноса описывается уравнением непрерывности, имеющим следующий вид:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = P_j - L_j - \frac{\partial(n_j V_{jz})}{\partial z}, \quad (4)$$

где n_j – концентрация j -ой нейтральной компоненты ($j=1,2,3$),
 P_j, L_j – члены, учитывающие образование и потери j -ой нейтральной компоненты в фотохимических реакциях, V_{jz} – вертикальная скорость j -ой нейтральной компоненты.

В общем случае, V_{jz} является суммой трёх составляющих:

$$V_{jz} = V_z^{(M)} + V_{jz}^{(m)} + V_{jz}^{(T)}, \quad (5)$$

где $V_z^{(M)}$ – макроскопическая скорость атмосферы, $V_{jz}^{(m)}, V_{jz}^{(T)}$ – скорости, обусловленные молекулярной диффузией и турбулентными процессами соответственно и имеют вид:

$$V_{jz}^{(m)} = D_j \left(\frac{\partial n_j}{\partial z} \right) + \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + V_j^{(M)} + \frac{1}{H_j} \right) n_j, \quad (6)$$

$$V_{jz}^{(T)} = D_T \left(\frac{\partial n_j}{\partial z} \right) + \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + V_j^{(M)} + \frac{1}{H_T} \right) n_j. \quad (7)$$

В формулах (5) - (7) использованы следующие обозначения:

$$V_j^M = \sum_{e \neq j} S_{je} n_e V_e / \sum_{e \neq j} S_{je} n_e, S_{je} = \frac{16 \mu_{je}}{3 m_j} \sigma_{je}^2 \sqrt{\frac{\pi kT}{2 \mu_{je}}}$$

$H_j = kT/m_j g$, $H_T = kT/\bar{m} g$, где k – постоянная Больцмана,

$D_j = \frac{kT}{m_j \sum_{e \neq j} S_{je} n_e}$ коэффициент молекулярной диффузии,

$\sigma_{je} = \frac{\sigma_j + \sigma_e}{2}$ – средний диаметр молекулы ($\sigma_{je} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ см), σ_j и σ_e – диаметр молекул,

$$\mu_{je} = \frac{m_j m_e}{m_j + m_e},$$

$\bar{m} = \frac{\sum_e m_e n_e}{\sum n_e}$ – средняя масса молекулы,

m_j, m_e – масса молекул,

g – ускорение свободного падения,

D_T – коэффициент турбулентной диффузии (задается эмпирически),

T – температура нейтрального газа.

Формула (5) для скорости молекулярной диффузии выводится из уравнения движения для нейтрального газа с учётом только сил давления, гравитации и трения "нейтрал – нейтрал". Выражения для скоростей турбулентной диффузии (6) – (7) записываются по аналогии с выражением (5).

Макроскопическая скорость может иметь порядок, равный порядку скорости молекулярной диффузии, и даже превосходить его, например, для зимних условий в полярных областях. Наблюдаются существенные сезонные различия в величинах макроскопической вертикальной скорости атмосферы, обусловленной глобальной системой циркуляции: так, для летнего периода эти скорости по абсолютной величине не превышают 0,5 см/с, в то время как для зимнего сезона максимальное значение составляет 4 см/с.

Перенос, обусловленный $V_z^{(M)}$, оказывает значительное влияние на величину концентрации нейтральных компонентов.

Система уравнений для скорости запишется в виде:

$$\frac{\partial v_j}{\partial t} = \frac{1}{1+v_2 f(\phi)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial v_j}{\partial z} \right) - V_3 \frac{\partial v_j}{\partial z} - \frac{v_j}{\rho} \sum_e n_e R_e + f_j \right\}, \quad (8)$$

$j = 1, 2, 3.$

Система уравнений (8) является связанной и нелинейной.

Проблема решения (8) состоит в том, что коэффициент V_3 является функцией от x, y, z, t , которая меняет знак в области определения решения.

Для численного решения (8) введем равномерную сетку:

$$\omega = \{x_i = x_0 + i \cdot h, t_N = k \cdot \tau, i = \overline{0, N}\},$$

где $h = (x_N - x_0) / N$, x_0, x_N, t_N - граничные значения.

Запишем разностную схему:

$$\frac{\hat{y}_i - y_i}{\tau} = \frac{1}{1+(y_2 f(\phi))_i} \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{\hat{y}_{i+1} - 2\hat{y}_i + \hat{y}_{i-1}}{h^2} - (y_3)_i \frac{\hat{y}_{i+1} - \hat{y}_{i-1}}{2h} - \left(\frac{1}{\rho} \sum_e n_e R_e \right)_i \hat{y}_i - f_i \right]. \quad (9)$$

Здесь индекс j опущен, τ и h - шаги разностной сетки по времени и пространственной переменной,

$$y_i = y_i^{k+1}, f_i = f_i^k,$$

где k - номер временного слоя,

i - номер узла по пространственной переменной.

Уравнение (9) приводится к системе алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$A_i^s \hat{y}_{i+1}^s - C_i^s \hat{y}_i^{s+1} + B_i^s \hat{y}_{i-1}^{s+1} = -F_i^s, \quad (10)$$

$$A_i^s = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{1}{h^2} - (y_3)_i \frac{1}{2h} \right] \frac{1}{(1+y_2 f(\phi))_i}, \quad (11)$$

$$B_i^s = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{1}{h^2} + (y_3)_i \frac{1}{2h} \right] \frac{1}{(1+y_2 f(\phi))_i}, \quad (12)$$

$$C_i^s = \frac{1}{\tau} + \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{1}{h^2} + \left(\frac{1}{\rho} \sum_e n_e R_e \right)_i \right] \frac{1}{(1+y_2 f(\phi))_i}, \quad (13)$$

$$F_i^s = (f_j)_i \frac{1}{(1+y_2 f(\phi))_i} + \frac{y_i}{\tau}. \quad (14)$$

Так как система (10) - (14) является нелинейной, то для ее решения необходимо проводить

линеаризацию. В данной работе линеаризация проводилась путем расчета коэффициентов по значениям неизвестной функции с предыдущего временного слоя. После линеаризации линейная относительно y_i система разностных уравнений, дополненная краевыми условиями, решалась методом прогонки:

$$\hat{y}_{i-1}^{s+1} = a_i^s \hat{y}_i^{s+1} + b_i^s, \quad (15)$$

где $i = N, \dots, 1, s$ - номер итерации.

Процесс прогонки численно устойчив, если выполняется условие монотонности $A_i > 0, B_i > 0, C_i > A_i + B_i$, или $a_i < 1$.

Поведение заряженных частиц в ионосфере в диапазоне высот $h=50-90$ км (D-область), описывается фотохимическими процессами на основе упрощенной модели преобразования положительных (рис. 1а) и отрицательных (рис. 1б) ионов, учитывающих зависимость скоростей преобразования ионов одних сортов в другие от электронной плотности и таких метеорологических параметров, как температура газа (Т) и концентрации малых нейтральных составляющих $H_2O, O, NO, O_2(^1\Delta_g), O_3, CO_2$.

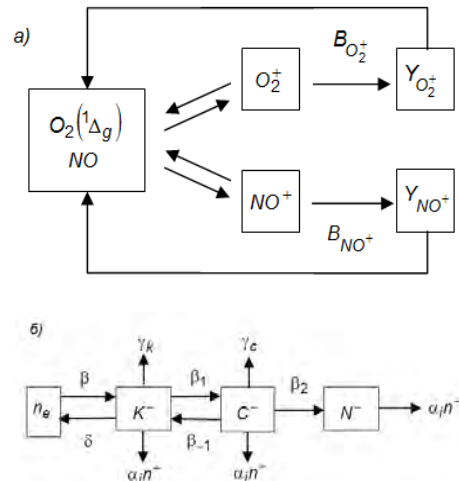


Рис. 1. Упрощенная модель преобразования положительных (а) и отрицательных (б) ионов в D-области ионосферы

Для скоростей ионизации и диссоциации рентгеновским и космическим излучением $q_j = q \cdot \gamma_j$, где q - суммарная скорость ионизации, $[N(^4S)] = [N(^4S)]_{фон} + \gamma_{N(^4S)}[e]_0, [O(^3P)] = [O(^3P)]_{фон} + \gamma_{O(^3P)}[e]_0$.

Задав вышеуказанные начальные условия, расчет проводим по уравнению неразрывности вида (16):

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha \cdot N \quad (16)$$

где q, α - скорости образования и потерь частиц N , записанном в разностном виде:

$$N_i^{j+1} = \frac{(q_i^{j+1} + N_i^j / \tau)}{(1/\tau + \alpha_i^{j+1})} \quad (17)$$

Согласно работе [8, с.557] для политропного газа была предложена формула (18) закона перемещения ударной волны со временем от центра взрыва источника с энергией E :

$$R = \beta \left(\frac{Et^2}{\rho} \right)^{1/5} \quad (18)$$

где $\beta=1,003$ - числовая константа.

Тогда формула для скорости распространения ударной волны имеет вид (19):

$$u = \frac{dR}{dt} = \frac{2\beta E^{1/5}}{5\rho^{1/5}t^{3/5}} \quad (19)$$

На основании (18) и (19) для выбранного нами значения ρ из модели [5-7] проводится сравнение результатов расчета.

Результаты расчетов

Используя формулы (2), (3), нами были проведены различные вычислительные эксперименты по расчету параметров ионосферной плазмы. Для примера на рис. 2 и 3 представлены результаты численного расчета скорости ионизации атмосферы Земли для различных значений возмущения \tilde{w}_y .

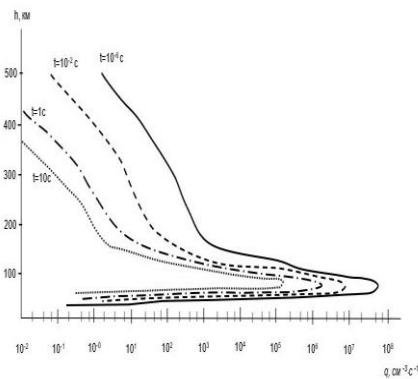


Рис. 2. Скорость ионизации q при $\tilde{w}_y = 500$ для различных моментов времени t

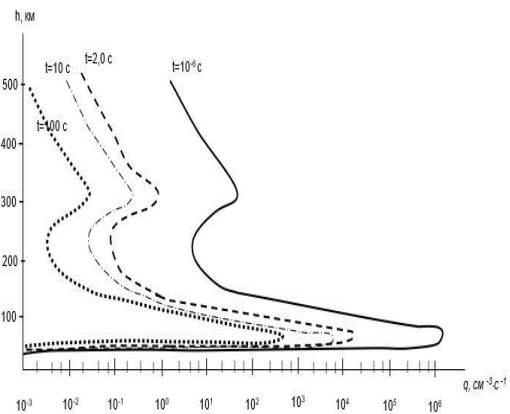


Рис. 3. Скорость ионизации q при $\tilde{w}_y = 300$ для различных моментов времени t

Полученные нами результаты высотного распределения скоростей ионизации от различных по мощности точечных источников могут служить для дальнейших исследований такого рода ионосферных возмущений.

Литература

1. Операция «Аргус», Атомиздат, 1960.
2. Операция «Морская звезда», Атомиздат, 1964
3. Поведение высокоэнергетичного плазменного сгустка в верхней ионосфере. Часть 1. Начальная стадия разлёта и торможения плазменного сгустка. / Е.Л. Ступицкий, А.Ю. Репин, А.С. Холодов, Я.А. Холодов. // Математическое моделирование. – 2004.- Т. 16. - №7. С. 43–58.
4. Численное исследование поведения высокоэнергетичного плазменного сгустка в верхней ионосфере. Часть 2. Разработка трёхмерной модели. / А.С. Холодов, Я.А. Холодов, Е.Л. Ступицкий, А.Ю. Репин. // Математическое моделирование. – 2004. - Т. 16. - №8. С. 3–23.
5. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Тимофеева И.В. Результаты численного расчета высотного распределения кислородных компонентов верхней атмосферы Земли. // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – Т.1. - №3. – С.163 – 167.
6. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Колин А.Д. Математическое моделирование реакции нижней области ионосферы для возмущенных условий. // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т.3. - №4. – С.154 – 158.
7. Медведев В.В., Телегин В. А., Колин А.Д. Математическое моделирование и численные методы дифференциальных уравнений. // сб. РадиоИнфоком-2019. С. 27-32.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие для вузов: в 10 т. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – Т. VI. Гидродинамика. - 736 с.

References

1. Operacija «Argus» [Operation "Argus"], Atomizdat, 1960.
2. Operacija «Morskaja zvezda» [Operation «Starfish»], Atomizdat, 1964
3. Povedenie vysokojenergetichnogo plazmennogo sgustka v verhnej ionosfere. Chast' 1. Nachal'naja stadija razljota i tormozhenija plazmennogo sgustka [Behavior of a high-energy plasma bunch in the upper ionosphere. Part 1. The initial stage of expansion and deceleration of a plasma bunch]. E.L. Stupickij, A.Ju. Repin, A.S. Holodov, Ja.A. Holodov. Matematicheskoe modelirovanie. 2004. T. 16. №7. С. 43–58.
4. Chislennoe issledovanie povedenija vysokojenergetichnogo plazmennogo sgustka v verhnej ionosfere. Chast' 2. Razrabotka trjohmernoj modeli [Numerical study of the behavior of a high-energy plasma bunch in the upper ionosphere. Part 2. Development of a three-dimensional model.]. A.S. Holodov, Ja.A. Holodov, E.L. Stupickij, A.Ju. Repin. Matematicheskoe modelirovanie. 2004. T. 16. №8. С. 3–23.
5. Medvedev V.V., Eremicheva V.E., Timofeeva I.V. Rezul'taty chislennogo rascheta vysotnogo raspredelenija kislorodnyh komponentov verhnej atmosfery Zemli [Results of numerical calculation of the altitude distribution of oxygen components of the Earth's upper atmosphere]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. T.1. №3. S.163 – 167.
6. Medvedev V.V., Eremicheva V.E., Kolin A.D. Matematicheskoe modelirovanie reakcii nizhnej oblasti ionosfery dlja vozmushhennyh uslovij [Mathematical modeling of the reaction of the lower region of the ionosphere for disturbed conditions]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2018. T.3. №4. S.154 – 158.
7. Medvedev V.V., Telegin V. A., Kolin A.D. Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody differencial'nyh uravnenij [Mathematical modeling and numerical methods of differential equations]. sb. RadiInfokom2019. S. 27-32.
8. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaja fizika: uchebnoe posobie dlja vuzov: v 10 t. [Theoretical physics: textbook for universities: in 10 volumes]. Moskva: FIZMATLIT, 2001. T. VI. Gidrodinamika. 736 s

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Васильевич Медведев, доктор физико – математических наук, профессор кафедры информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет», 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Виктория Евгеньевна Еремичева, доцент кафедры информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет», 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: viksik111@yandex.ru

Антон Дмитриевич Колин, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет», 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: yojik14@gmail.com

Vladimir V. Medvedev, Dr. Sci. (Phys.-Math)., Professor of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Viktorija E. Eremicheva, assistant professor of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: viksik111@yandex.ru

Anton D. Kolin, Senior Lecturer of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: yojik14@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.10.2021

Принята к публикации: 16.11.2021



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru <http://morintex.ru>

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются **НОВЫЕ** научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлекцией 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.

Редколлекция не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по 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**

Архипов А.В., Рыбников Н.И.

Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**