

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

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

ISSN 2073-7173 (print) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101

ISSN 2538-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

001010010110011001001100100111011001100010011001001010100011100110010011100010110100100100

0011010100110100100010110100101000100100011111100110011001101101011001110000001110010100101

1101110011001010111100101010010100110100111000101100101001100101111001010111100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001

0011000111001001100010100101001111010101010000010101000110101110011001000111001010010010100

00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 1 (47) Т.3 2020
1 PART 3 2020



Труды
Санкт-Петербургского
государственного морского технического университета



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 том 3 2020 Сквозной номер 47

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.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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 www.morintex.ru в открытом доступе. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в E-library и в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI). Для аспирантов публикации бесплатно.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки в 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

Шифр	Отрасль науки, группа специальностей	по которым присуждается ученая степень
05.08.00	Кораблестроение	
05.08.01	Теория корабля и строительная механика	Технические
05.08.03	Проектирование и конструкция судов	Технические
05.08.04	Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства	Технические, экономические
05.08.05	Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)	Технические
05.08.06	Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие	Технические, Физико-математические
05.13.00	Информатика, вычислительная техника и управление	
05.13.01	Системный анализ, управление и обработка информации	Технические, Физико-математические
05.13.06	Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)	Технические
05.13.10	Управление в социальных и экономических системах	Технические
05.13.11	Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей	Технические, Физико-математические
05.13.12	Системы автоматизации проектирования	Технические, Физико-математические
05.13.17	Теоретические основы информатики	Технические, Физико-математические
05.13.18	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.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

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

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

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»

Дизайн: А.В. Антонов,

Верстка: А.И. Соломонова



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 part 3 2020 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 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

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"

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



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 том 3 2020 (Сквозной номер 47)

www.morintex.ru

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

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, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, 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.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

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, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 part 3 2020 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, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy, 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

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

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, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

Санкт-Петербург
190000, Английская наб., д. 38
Тел./факс: (812) 315 4945

Санкт-Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: (812) 423 1600

Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

Разработка технической документации для обеспечения модернизации, ремонта и сервисного обслуживания кораблей и судов ВМФ.

Разработка документов по стандартизации (ГОСТ РВ, ОСТВ и др.).

Сбор и хранение копий технических условий на продукцию, разработанную по заказам Минобороны России и поставка их исполнителям ГОЗ.



К 80-ЛЕТИЮ ЗУЕВА ВАЛЕРИЯ АНДРЕЕВИЧА



Зуев Валерий Андреевич, 1940 года рождения, в 1965 году окончил с отличием кораблестроительный факультет Горьковского политехнического института и был оставлен на факультете для учебы в аспирантуре. В 1970 г. он защитил кандидатскую диссертацию. С 1969 г. по 1972 г. работал в Комсомольском-на-Амуре политехническом институте, пройдя путь от ассистента, доцента до заведующего кафедрой высшей математики.

С 1972 г. В.А. Зуев на педагогической работе в Горьковском политехническом институте. В 1981 г. он избирается на должность заведующего кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника» и в этой должности работает до сих пор. В 1991 г. В.А. Зуеву присвоено звание профессора, в 1996г. он защитил докторскую диссертацию.

Кафедра «Кораблестроение и авиационная техника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, которую возглавляет проф. В.А. Зуев, сыграла решающую роль в подготовке инженеров-кораблестроителей для судостроительных организаций и предприятий Нижнего Новгорода как гражданского, так и военного профиля. В.А. Зуев является одним из разработчиков современной концепции многоуровневой подготовки специалистов по направлению «Кораблестроение и океанотехника». В.А. Зуев подготовил 17 кандидатов наук, из которых 2 стали докторами наук.

Общий стаж работы - 57 лет в отрасли - 55 лет в данном коллективе - 48 лет Профессор В.А. Зуев известный у нас в стране и за рубежом специалист в области ледотехники, основатель и руководитель нижегородской научной школы по энергосберегающим технологиям и средствам разрушения ледяного покрова и связанных с этим фундаментальных и прикладных исследований взаимодействия со льдом надводных и подводных объектов. Под его руководством разработана уникальная техническая система – промышленный образец ледокольной платформы на воздушной подушке не имеющий аналогов в России. Руководит опытно-конструкторским бюро «Лед».

В.А. Зуев – автор более 250 научных и научно-методических работ, в том числе 6 научных монографий и 14 учебных пособий. Ему принадлежат 20 авторских свидетельств и патентов.

Сердечно поздравляем Вас, уважаемый Валерий Андреевич, с юбилеем и желаем Вам доброго здоровья, счастья и дальнейших успехов в Вашей плодотворной научной деятельности на благо Отечества!



ТРУДЫ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СОДЕРЖАНИЕ

стр

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Модификация инерционно-жесткостных характеристик модели как путь решения задач о ее установившихся колебаниях.....	12
Андрюшин А.В., Хлыстова К.Б. Обеспечение работоспособности главного электродвигателя и пирамидальной прочности пропульсивного комплекса судов ледового класса.....	20
Яковлев А.Ю., Тхант Зин Метод учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей.....	25
Зин Мин Хтет Определение EEDI _{weather} при продольной качке судна с крыльевыми устройствами в репрезентативном состоянии моря	30
Зин Мин Хтет Исследования особенностей снижения продольной качки и дополнительного сопротивления судна с крыльевыми устройствами.....	38

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Гайкович А.И., Никитин Н.В., Соне Пьяе Разработка и исследование математической модели проектирования патрульного катера для союза Мьянма.....	51
Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна.....	58
Гончаров В.К., Пяткин В.А. Исследование взаимодействия ледовых полей с неподвижной преградой.....	66
Суслов А.Н. Одегова О.В., Сунь Тяньши О подходах к созданию системы автоматизированного мониторинга остойчивости судна.....	72

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Агиевич М. А., Гурченко В. В., Чжай С., Дуань Ц., Хоу Б., Грибанькова А. А. Создание противокоррозионного композиционного цинкового покрытия стали для эксплуатации в средах, содержащих сульфатредуцирующие бактерии.....	75
---	----

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Корнев А.С., Кузнецов В.И., Пань Х., Сеньков А.П. Способы компенсации высших гармоник напряжения в судовых электроэнергетических системах.....	82
Сеньков А.П., Сеньков А.А. Преобразование энергии ветровых волн в электрическую энергию.....	87
Минасян М.А., Минасян А.М., Цзэн Цзюньцзе, Лэ Хи Ха О возможности использования канатных опор «tamsar» в качестве отдельных или сборных муфт и устройства для определения их жесткости.....	93
Медведев В.В., Гаврилов В.В., Сорокин И.А. Оценка возможности уменьшения конструктивного коэффициента энергетической эффективности за счет применения валогенераторов в составе судовых энергетических установок с главными высокооборотными двигателями.....	101

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Михлин В.Г., Семенов Н.Н., Михлина Е.Б. Средства информационного обеспечения функционирования группы автономных необитаемых подводных аппаратов с мультиагентной системой управления.....	107
--	-----

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Егоров С.Б., Горбачев Р.И. Выбор порога селекции сигнала по уровню в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом.....	111
---	-----

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И
ПРОИЗВОДСТВАМИ**

Агафонов А.М., Воршевский А.А., Воршевский П.А., Гришаков Е.С., Корнев А.С. Обеспечение электромагнитной совместимости систем интеллектуального управления при появлении помех в судовых кабельных трассах.....	115
--	-----

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Нечаев Ю.И. Комплекс физико-математического моделирования при функционировании мультиагентных систем.....	121
Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Функционирование бортовой интеллектуальной системы на основе комплекса управляемого дистанционного эксперимента.....	127
Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Интеллектуальная технология контроля динамической непотопляемости беспилотного судна.....	133
Янчин И.А. Анализ навигационной аварии с использованием аппарата современной теории катастроф.....	139

CONTENTS	page
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Armen L. Melkonian, Dmitry A. Nikolaev Modification of inertial-stiffness characteristics of the model as a way to solve problems of its steady-state oscillations.....	12
Alexandr V. Andrushin, Kseniia B. Khlystova Ensuring the main electric engine operability and pyramidal strength of the propulsion system of ice ships.....	20
Aleksey Yu. Yakovlev, Thant Zin Scale effect evaluation method of hydrofoil sections.....	25
Zin Min Htet The determination of EEDI _{weather} during the longitudinal motion of a ship with wing devices in a representative sea condition	30
Zin Min Htet Study of peculiarities of reducing longitudinal motions and added resistance for a ship with wing devices.....	38
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Alexander I. Gaikovich, Nikolay V. Nikitin, Sonne Pyeye Development and research of the mathematical model of designing a patrol boat for the union Myanmar.....	51
Gennady B. Kryzhevich, Anton R. Filatov Bulk carrier aluminum hatch cover optimization.....	58
Vadim K. Goncharov, Vasily A. Pyatkin Study of the ice fields interaction with fixed barrier.....	66
Alexander N. Suslov, Olga V. Odegova, Sun Tanshi Approaches for the stability automation monitoring creation.....	72
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Maria A. Agievich, Valentin V. Gurchenko, Xiaofan Zhai, Jizhou Duan, Baorong Hou, Anzhela A. Gribankova Creation of anti-corrosion composition zinc coating of steel for operation in the media containing sulfate-reducing bacteria.....	75
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Aleksandr S. Kornev, Viktor I. Kuznetsov, Hangyu Pan, Aleksey P. Sen'kov Methods for compensation of high voltage harmonics in shipboard electric power systems.....	82
Aleksey P. Sen'kov, Andrey A. Sen'kov Converting wind wave energy into electrical energy.....	87
Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Tszyuntsze Tszen, Le Huy Ha About the possibility of using "mamsar" rope supports as separate or prefabricated couplings and devices for determining their stiffness.....	93
Valery V. Medvedev, Vladimir V. Gavrilov, Ivan A. Sorokin Evaluation of the possibility of reducing the energy efficiency design index based on the application of shaft generators in the composition of marine power plant with main high-speed engine.....	101
INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS	
Valeriy G. Mikhlin, Nikolai N. Semenov, Elena B. Mikhlina Means of information support for the functioning of the Autonomous Uninhabited Underwater Vehicle group with a multi-agent control system.....	107
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Roman I. Gorbachev, Stanislav B. Egorov Threshold of signal level selector in detectors with normalized indicator process.....	111
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Alexey M. Agafonov, Alexander A. Worshevsky, Petr A. Vorshevskii, Evgenii S. Grishakov, Alexander S. Kornev Electromagnetic compatibility obtaining of intellectual control systems under electromagnetic interference in shipboard cable runs.....	115

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Yuri I. Nechaev Complex for physical and mathematical modeling at the functioning of multi-agent systems.....	121
Yuri I. Nechaev, Oleg N. Petrov Functioning of the onboard intellectual system based on the complex of a controlled remote experiment.....	127
Yuri I. Nechaev, Oleg N. Petrov Intellectual technology for control of dynamic unsinkability on the unmanned vessels.....	133
Ivan A. Yanchin Navigational accident analysis using the modern catastrophe theory.....	139

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.037
УДК 629.12: 539.433

Модификация инерционно-жесткостных характеристик модели как путь решения задач о ее установившихся колебаниях

А.Л.Мелконян¹, Д.А.Николаев¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье предлагается метод, реализация которого позволит единообразно решать задачи об установившихся колебаниях конструкций, моделируемых квазиодномерными моделями. Суть метода состоит в коррекции и модификации значений инерционно-жесткостных характеристик такой модели, а так же внешней нагрузки, на нее действующей. При реализации метода учет влияния дополнительных факторов, усложняющих картину вибрации, осуществляется автоматически.

В качестве примера рассмотрена задача о совместной вибрации судового корпуса и его конструктивного модуля в случае сравнительно небольшой протяженности района их сопряжения. Проанализированы первые варианты решения авторами задачи. Для плоского варианта задачи о совместной вибрации судового корпуса и конструктивного модуля выполнен анализ дополнительной нагрузки. Сформирована обобщенная матрица инерции конечного элемента модели судового корпуса в точке сопряжения. Приведена обобщенная матрица инерции для случая присоединения модуля L-образной формы. Предложен алгоритм расчета параметров вибрации (на основе дискретного варианта метода парциальных откликов). Выведены формулы для парциальных откликов и парциальных параметров, необходимые при реализации предложенного алгоритма.

Ключевые слова: установившиеся колебания, квазиодномерная модель, совместные колебания, инерционно-жесткостные характеристики, парциальные отклики.

Modification of the inertial-stiffness characteristics of the model as a way to solve problem of its steady-state oscillation

Armen L. Melkonian¹, Dmitry A. Nikolaev¹

¹Saint-Petersburg State Marine Technical University

Abstract. The article proposes a method, the implementation of which will uniformly solve the problem of steady-state oscillations of structures modeled by quasi-one-dimensional models. The method consists in correcting and modification the values of the previous inertial-stiffness characteristics of such a model, as well as the external load acting on it. When implementing the method, the influence of additional factors complicating the picture of vibration is taken into account automatically.

The problem of joint vibration of the ship's hull and its structural module in the case of a relatively small length of the area of their contact is considered. The authors analyzed the first variants of solution of the problem. For the two-dimensional version of the problem of joint vibration of the ship's hull and structural module, the analysis of the additional load is performed. A generalized inertia matrix of the finite element of the ship hull model at the contact point with the L- element is formed. The algorithm of calculation of parameters of a vibration (on the basis of a discrete variant of a method of partial responses) is offered. Formulas for partial responses and partial parameters necessary for the implementation of the proposed algorithm were created.

Keywords: steady-state oscillations, quasi-one-dimensional model, joint oscillations, inertial-stiffness characteristics, partial responses.

В статье предлагается метод решения довольно широкого круга задач об установившихся колебаниях квазиодномерной конструкции, моделируемой пространственно-криволинейной дискретной системой (см. [1, 5]), при учете дополнительных факторов, усложняющих картину исследуемого процесса. Алгоритм действий в этом случае следующий:

- на первой стадии следует проанализировать влияние дополнительного фактора на модель (т.е. понять структуру дополнительных усилий, порождаемых его учетом); возникающие при этом дополнительные усилия надо разделить на три группы:

- к первой группе отнести слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным и (или) относительным смещениям, скоростям и ускорениям. Действие слагаемых первой группы учесть коррекцией и (или) модификацией модели, введя в нее дополнительные инерционные свойства

- и упругие связи. При этом учет усилий, пропорциональных смещениям, требует введения соответствующих пружин (линейных или спиральных), жесткости которых будет действительными положительными числами. Учет усилий, пропорциональных ускорениям, после перехода к квазистатической модели [2], потребует замены инерционных характеристик действием пружин, жесткости которых будут действительными отрицательными числами. Учет усилий, пропорциональных скоростям, согласно методу комплексных параметров [2], потребует введения пружин, жесткости которых будут мнимыми величинами. Зависимость дополнительного усилия от абсолютной скорости удобнее сначала выполнить комплексностью инерционных характеристик, а зависимость от относительной скорости - комплексностью характеристик жесткости модели;

- выделить слагаемые, которые можно учесть коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к

квазистатической модели (слагаемые второй группы);

- формализовать структуру слагаемых, учесть действие которых модификацией квазиодномерной модели не удалось (слагаемые третьей группы).

При реализации алгоритма влияние слагаемых первых двух групп следует выполнить коррекцией и (или) модификацией инерционно – жесткостных характеристик квазиодномерной модели и внешней нагрузки, на нее действующей. Такие действия приведут к автоматическому учету влияния этих слагаемых. При наличии слагаемых третьей группы следует воспользоваться методом последовательных приближений. Предлагаемый подход авторы называют *методом модификации инерционно-жесткостных характеристик и внешней нагрузки*.

Проиллюстрируем применение предложенного метода в ходе решения задачи о совместной вибрации судового корпуса и некоторого элемента, если протяженность района их сопряжения сравнительно мала (поле перекрытия, надстройка, поперечная переборка с навешенным оборудованием и т.п.).

Как уже говорилось ранее в [1] для расчета параметров вибрации конструкций, обладающих существенно большей протяженностью вдоль некоторой оси, удобно воспользоваться квазиодномерной моделью в виде последовательно соединенных однотипных конечных элементов. Особенно удобно такое представление при анализе установившихся колебаний, так как квазистатическая аналогия [2] позволяет перейти к квазистатическому варианту модели. В этом случае модель представляет совокупность абсолютно твердых и безынерционных элементов, соединенных между собой и неподвижным основанием упругими связями, каждая из которых порождает усилия определенной структуры (пропорциональные смещению, скорости, ускорению). При учете внешних и внутренних сил сопротивления жесткости этих упругих связей будут комплексными величинами [2]. В частном случае, когда частота колебаний равна нулю, имеет место статический расчет параметров деформирования квазиодномерной модели.

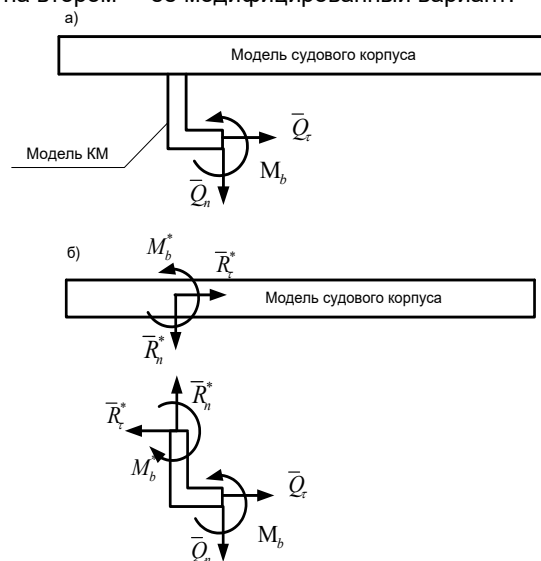
Толчком к разработке предлагаемого метода послужил материал статьи [3], где приводилось решение задачи о совместной вибрации судового корпуса и поля его днищевого перекрытия. Алгоритм расчета основывался на организации последовательных приближений: на первом этапе при действии задаваемой внешней нагрузки рассчитывалась амплитуда поперечной вибрации балочной модели судового корпуса в точке сопряжения с моделью поля днищевого перекрытия (модель поля - масса на упругой связи). Затем рассчитывалась величина опорной реакции, передаваемой модели судового корпуса со стороны модели поля днищевого перекрытия при кинематическом возбуждении его колебаний (к модели поля перекрытия дополнительно прикладывалась сила инерции переносного движения). На следующем этапе вновь рассчитывалась амплитуда поперечной вибрации модели корпуса в точке сопряжения, но кроме задаваемой внешней нагрузки учитывалось действие равной и противоположно направленной опорной

реакции в точке сопряжения с моделью поля днищевого перекрытия. По найденной во втором приближении амплитуде поперечной вибрации вновь рассчитывалась величина опорной реакции поля днищевого перекрытия уже на кинематическое возбуждение второго приближения; и т.д. Процесс последовательных приближений продолжался до тех пор, пока отличие результатов последних приближений не оказывалось в пределах наперед заданной погрешности. Очевидно, что каждой частоте вынуждающего воздействия соответствовала своя величина опорной реакции. Результаты расчета показали не только существенное количественное изменение амплитуд поперечной вибрации судового корпуса, но даже изменение формы его колебаний.

Желание избежать организации последовательных приближений привело к разработке алгоритма, основанного на вычислении динамических коэффициентов взаимовлияния сопрягающихся моделей с последующим раскрытием статической неопределенности в точке сопряжения моделей. Соответствующий алгоритм был реализован в [5].

В работе [4], посвященной вопросам совместной вибрации судового корпуса и его конструктивных модулей с малой протяженностью района сопряжения (КМ), был предложен подход, также позволяющий избежать организации последовательных приближений. Суть предлагаемого подхода заключалась в сведении квазидвумерной задачи о совместной вибрации модели корпуса и модели КМ к задаче о вибрации некоторой новой, квазиодномерной модели, свойства которой в точке сопряжения с моделью КМ автоматически учитывают влияние присоединяемой модели.

Проиллюстрируем реализацию предложенного подхода в процессе решения задачи о совместной вибрации судового корпуса и конструктивного модуля (КМ) с малым районом их сопряжения. При этом в качестве модели КМ будем использовать квазиодномерную модель из [5]; на первом этапе расчета в качестве модели судового корпуса будем так же использовать квазиодномерную модель из [5], а на втором – ее модифицированный вариант.



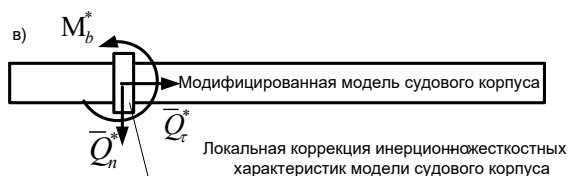


Рис.1

При совместной вибрации (см. рис.1.а) со стороны конструктивного модуля на судовой корпус должны передаваться некоторые реактивные усилия $\bar{R}^*(R_\tau^*; R_n^*)$ и M_b^* (см. рис.1.б). Эти реакции, в соответствии с принципом суперпозиции реакций линейных силовых полей [2], могут быть представлены в виде суммы реакций, обусловленных приложением к КМ внешней нагрузки $\bar{Q}(Q_\tau; Q_n); M_b$ (на рис.1.в эти реакции обозначены $\bar{Q}^*(Q_\tau^*; Q_n^*)$ и M_b^* , соответственно), и реакциями $\bar{R}(R_\tau; R_n)$ и M_b , обусловленными кинематическим возбуждением точки сопряжения с моделью судового корпуса, т.е.

$$\bar{R}^* = \bar{Q}^* + \bar{R}; M_b^* = M_b + M_b.$$

Поскольку судовой корпус для КМ является некоторой опорой, предварительно следует определить ее коэффициенты жесткости. Для этого на первом этапе к модели судового корпуса в точке сопряжения с КМ следует поочередно приложить единичные усилия ($N_\tau = 1; N_n = 1; M_b = 1$) и найти величины соответствующих смещений ($w_\tau; w_n; \mathcal{G}_b$), имеющих место при заданной частоте вынуждающего воздействия ω . Очевидно, что вычисленные величины представляют собой динамические податливости модели судового корпуса в точке сопряжения с КМ. Жесткости соответствующих упругих связей, формирующих упругую опору для КМ в точке сопряжения, будут по отношению к податливостям обратными величинами.

Реакции $\bar{Q}^*(Q_\tau^*; Q_n^*)$ и M_b^* находятся как реакции модели КМ в точке сопряжения с моделью судового корпуса от действия на КМ гармонически изменяющейся с частотой ω внешней нагрузки $\bar{Q}(Q_\tau; Q_n)$ и M_b ; расчет выполняется, например, по программе из [5].

Несколько подробнее остановимся на расчете реакций от кинематического возбуждения точки сопряжения моделей, которые могут быть учтены модификацией модели судового корпуса.

Поскольку используемая на первом этапе расчета модель КМ допускает приложение усилий, а смещения являются следствием этого приложения, то для вычисления реакций от кинематического возбуждения с единичной амплитудой следует применить следующий алгоритм.

Прикладываем к модели КМ в точке сопряжения моделей изменяющуюся по гармоническому закону с частотой ω единичную продольную силу и получаем

в этой точке значения смещений $\bar{w}_1(w_{1\tau}; w_{1n})$ и \mathcal{G}_{1b} . Затем прикладываем в точке сопряжения единичную поперечную силу и получаем в этой точке значения смещений $\bar{w}_2(w_{2\tau}; w_{2n})$ и \mathcal{G}_{2b} . Прикладываем в точке сопряжения единичный изгибающий момент и получаем в этой точке значения смещений $\bar{w}_3(w_{3\tau}; w_{3n})$ и \mathcal{G}_{3b} . Для вычисления комплекта опорных реакций $\bar{R}_1(R_{1\tau}; R_{1n})$ и M_{1b} , вызванных единичным кинематическим возбуждением вдоль оси τ (при этом смещение вдоль оси n и угол поворота вокруг оси b должны быть равными нулю), должны выполняться следующие условия:

$$R_{1\tau} w_{1\tau} + R_{1n} w_{2\tau} + M_{1b} w_{3\tau} = 1;$$

$$R_{1\tau} w_{1n} + R_{1n} w_{2n} + M_{1b} w_{3n} = 0;$$

$$R_{1\tau} \mathcal{G}_{1b} + R_{1n} \mathcal{G}_{2b} + M_{1b} \mathcal{G}_{3b} = 0$$

Решение этой системы уравнений дает искомые величины $\bar{R}_1(R_{1\tau}; R_{1n})$ и M_{1b} . Действие этих реакций может быть учтено введением в точку сопряжения комплекса упругих опор. Первая упругая опора с положительной жесткостью $c_{\tau\tau}$ (ее величина численно равна величине силы $R_{1\tau}$) создает продольную силу, пропорциональную единичному продольному смещению (физическая модель – линейная пружина); ее действие целесообразно учесть установкой в точке сопряжения дополнительной упругой опоры либо коррекцией массы модели корпуса в продольном направлении. Вторая упругая опора с положительной жесткостью $c_{\tau n}$ (численно равную R_{1n}) создает поперечную силу, пропорциональную единичному продольному смещению; ее действие может быть учтено либо установкой дополнительной опоры, обладающей таким свойством, либо введением новой инерционной характеристики. Третья упругая опора с положительной жесткостью $c_{\tau b}$ (численно равную M_{1b}) создает изгибающий момент, пропорциональный единичному продольному смещению; ее действие может быть учтено установкой дополнительной опоры, обладающей таким свойством, либо введением новой инерционной характеристики.

Аналогично следует поступить при вычислении комплекта опорных реакций $\bar{R}_2(R_{2\tau}; R_{2n})$ и M_{2b} , вызванных единичным кинематическим возбуждением вдоль оси n (при этом смещение вдоль оси τ и угол поворота вокруг оси b должны быть равными нулю), а так же при вычислении комплекта опорных реакций $\bar{R}_3(R_{3\tau}; R_{3n})$ и M_{3b} , вызванных единичным кинематическим возбуждением при вращении вокруг оси b .

В качестве простого примера, иллюстрирующего сказанное, рассмотрим жесткое присоединение к судовому корпусу модели КМ в виде L-образного абсолютно твердого стержня с сосредоточенной массой на конце (см. рис.2).

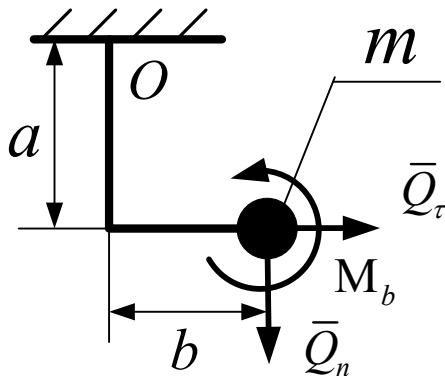


Рис.2

В этом случае усилия, передаваемые со стороны модели КМ модели судового корпуса будут

$$Q_{\tau}^* = Q_{\tau}; \quad Q_n^* = Q_n; \quad M_b^* = M_b + aQ_{\tau} - bQ_n,$$

а коэффициенты жесткости соответствующих упругих связей

$$c_{\tau\tau} = m\omega^2; \quad c_{nn} = m\omega^2; \quad c_{n\tau} = c_{\tau n} = 0;$$

$$c_{b\tau} = c_{\tau b} = m\omega^2 a; \quad c_{nb} = c_{bn} = m\omega^2 b;$$

$$c_{bb} = m\omega^2 (a^2 + b^2).$$

Анализ приведенных результатов показывает, что действие модели КМ на модель судового корпуса может быть учтено тремя группами слагаемых. Слагаемые первой группы могут быть учтены изменением внешней нагрузки, приложенной в точке сопряжения с КМ (в рассмотренном примере это величины Q_{τ}^* ; Q_n^* ; M_b^*). Слагаемые второй группы могут быть учтены изменением инерционных характеристик модели корпуса (в рассмотренном примере это коррекция инерционности в продольном и поперечном направлениях, а так же инерционности при вращении относительно бинормали), Учет действия этих слагаемых может быть выполнен увеличением в точке сопряжения с моделью КМ массы модели судового корпуса на величины $m_{\tau\tau}^* = m$ и $m_{nn}^* = m$, соответственно, а так же момента инерции масс относительно бинормали на величину $I_{bb}^* = m(a^2 + b^2)$. Действие оставшейся части слагаемых может быть учтено оснащением модели судового корпуса дополнительными, прежде не проявившимися, инерционными свойствами, (в рассмотренном примере - это силы, вызванные поворотом модели КМ, а так же моменты, вызванные продольным и поперечным смещениями модели КМ). Предлагаемый подход позволяет избежать организации последовательных приближений, так как возникающие инерционные усилия пропорциональны соответствующим ускорениям в

точке сопряжения. Эти усилия, при учете квазистатической аналогии, могут быть учтены введением упругих связей отрицательной жесткости, усилия которых пропорциональны соответствующим смещениям. При таком подходе инерционные характеристики элемента модифицированной модели корпуса в точке сопряжения с КМ можно свести в блочную матрицу инерции вида

$$\begin{bmatrix} \tilde{m}_{\tau\tau} = m_{\tau\tau} + m_{\tau\tau}^*; & 0; & s1_{\tau b}^* = ma \\ 0; & \tilde{m}_{nn} = m_{nn} + m_{nn}^*; & s1_{nb}^* = mb \\ s2_{b\tau}^* = ma; & s2_{bn}^* = mb; & \tilde{I}_{bb} = I_{bb} + I_{bb}^* \end{bmatrix}$$

Здесь статические моменты $s1_{ij}$ и $s2_{ij}$,

$i, j = \tau, n, b$ отражают появившиеся новые инерционные свойства (характеристики со звездочкой отражают влияние присоединения КМ, а характеристики с «волной» - откорректированные значения прежних инерционных характеристик). Заметим, что инерционные характеристики исходной модели включали только массу и тензор инерции (в рассматриваемом примере – массу и осевой момент инерции масс относительно бинормали),

Как уже говорилось выше, применение квазистатической аналогии позволяет перейти к квазистатическому варианту модифицированной модели судового корпуса. При этом установка комплексов дополнительных опор в точке сопряжения с моделью КМ требует включения в алгоритм расчета из [5] дополнительного комплекта формул, учитывающих изменение парциальных откликов (ПО) и парциальных параметров (ПП) при прохождении этих опор.

Ниже выполнен вывод этих формул.

Прохождение опоры, ориентированной вдоль главной нормали n , восстанавливающая сила упругости которой пропорциональна углу поворота поперечного сечения вокруг бинормали b .

Сначала рассмотрим изменение ПО при приложении единичной силы $N_n = 1$, направленной вдоль главной нормали n . В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме силы $N_n = 1$ будет действовать направленная в противоположную сторону опорная реакция R_1 (см. рис.3); ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали b , т.е. соответствующему ПО.

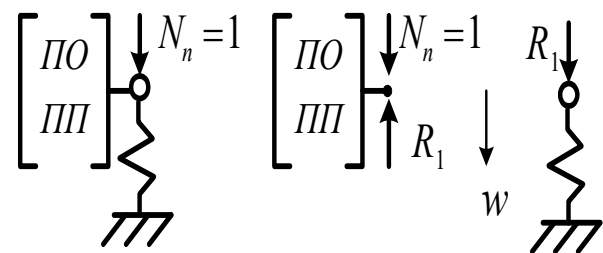


Рис.3

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$B'_{bn} = B_{bn}(N_n - R_1); \text{ где } R_1 = c_{bn} \cdot B'_{bn}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

$$\text{а) } B'_{bn} = \frac{B_{bn}}{1 + B_{bn}c_{bn}}; \text{ б) } R_1 = c_{bn} \cdot B'_{bn};$$

$$\text{в) } A'_{nn} = A_{nn}(1 - R_1); \text{ г) } A'_{tn} = A_{tn}(1 - R_1).$$

Теперь рассмотрим изменение ПО при приложении единичной продольной силы $N_\tau = 1$, направленной вдоль нейтральной оси. В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме силы $N_\tau = 1$, будет действовать направленная вдоль главной нормали n опорная реакция R_2 ; ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали, т.е. соответствующему ПО.

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$B'_{br} = B_{br}N_\tau - B_{bn}R_2; \text{ где } R_2 = c_{bn} \cdot B'_{br}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

$$\text{а) } B'_{br} = \frac{B_{br}}{1 + B_{bn}c_{bn}}; \text{ б) } R_2 = c_{bn} \cdot B'_{br};$$

$$\text{в) } A'_{nr} = A_{nr} - A_{nn}R_2; \text{ г) } A'_{tr} = A_{tr} - A_{tn}R_2.$$

Теперь рассмотрим изменение ПО при приложении единичного изгибающего момента $M_b = 1$, направленного вдоль бинормали. В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме силы $N_\tau = 1$, будет действовать направленная вдоль главной нормали n опорная реакция R_3 ; ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали, т.е. соответствующему ПО.

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$D'_{bb} = B_{bb}M_b - B_{bn}R_3; \text{ где } R_3 = c_{bn} \cdot D'_{bb}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

$$\text{а) } D'_{bb} = \frac{D_{bb}}{1 + B_{bn}c_{bn}}; \text{ б) } R_3 = c_{bn} \cdot D'_{bb};$$

$$\text{в) } C'_{tb} = C_{tb} - A_{tn}R_3; \text{ г) } C'_{nb} = C_{nb} - A_{nn}R_3.$$

Теперь рассмотрим изменение ПП, отражающих действие на парциальную систему внешней нагрузки.

В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему будет действовать направленная вдоль главной нормали опорная реакция R_4 (см. рис.4); ее величина пропорциональна углу поворота поперечного сечения на этой опоре вокруг бинормали (т.е. соответствующему ПП).

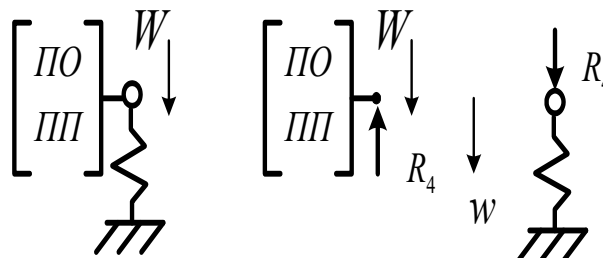


Рис.4

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$Q'_b = Q_b - B_{bn}R_4; \text{ где } R_4 = c_{bn} \cdot Q'_b.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПП будет:

$$Q'_b = \frac{Q_b}{1 + B_{bn}c_{bn}}; \text{ где } R_4 = c_{bn} \cdot Q'_b;$$

$$W'_n = W_n - A_{nn}R_4; \text{ где } W'_\tau = W_\tau - A_{tn}R_4.$$

Прохождение опоры, ориентированной вдоль касательной, восстанавливающая сила упругости которой пропорциональна углу поворота поперечного сечения вокруг бинормали, выполняется аналогично и приводит к выводу следующих формул:

$$B'_{bn} = \frac{B_{bn}}{1 + B_{br}c_{br}}; \text{ где } R_5 = c_{br} \cdot B'_{bn};$$

$$A'_{nn} = A_{nn} - A_{nr}R_5; \text{ где } A'_{tn} = A_{tn} - A_{tr}R_5.$$

$$B'_{br} = \frac{B_{br}}{1 + B_{br}c_{br}}; \text{ где } R_5 = c_{br} \cdot B'_{br};$$

$$A'_{nr} = A_{nr} - A_{nr}R_6; \text{ где } A'_{tr} = A_{tr} - A_{tr}R_6.$$

$$D'_{bb} = \frac{D_{bb}}{1 + B_{br}c_{br}}; \text{ где } R_7 = c_{br} \cdot D'_{bb};$$

$$C'_{tb} = C_{tb} - A_{tr}R_7; \text{ где } C'_{nb} = C_{nb} - A_{nr}R_7.$$

$$Q'_b = \frac{Q_b}{1 + B_{br}c_{br}}; \text{ где } R_8 = c_{br} \cdot Q'_b;$$

$$W'_n = W_n - A_{nr}R_8; \text{ где } W'_\tau = W_\tau - A_{tr}R_8.$$

Прохождение опоры, ориентированной вдоль главной нормали n , восстанавливающая сила упругости которой пропорциональна продольному смещению вдоль оси τ , выполняется аналогично и приводит к выводу следующих формул:

$$A'_{nn} = \frac{A_{nn}}{1 + A_{nn}c_{\tau n}}; \quad R_9 = c_{\tau n} \cdot A'_{nn};$$

$$B'_{bn} = B_{bn}(1 - R_9); \quad A'_{\tau n} = A_{\tau n}(1 - R_9).$$

$$A'_{n\tau} = \frac{A_{n\tau}}{1 + A_{nn}c_{\tau n}}; \quad R_{10} = c_{\tau n} \cdot A'_{n\tau};$$

$$B'_{b\tau} = B_{b\tau} - B_{bn}R_{10}; \quad A'_{\tau\tau} = A_{\tau\tau} - A_{\tau n}R_{10}.$$

$$C'_{nb} = \frac{C_{nb}}{1 + A_{nn}c_{\tau n}}; \quad R_{11} = c_{\tau n} \cdot C'_{nb};$$

$$C'_{\tau b} = C_{\tau b} - A_{\tau n}R_{11}; \quad D'_{bb} = D_{bb} - B_{bn}R_{11}.$$

$$W'_{\tau} = \frac{W_{\tau}}{1 + A_{nn}c_{\tau n}}; \quad R_{12} = c_{\tau n} \cdot W'_{\tau};$$

$$W'_n = W_n - A_{nn}R_{12}; \quad Q'_b = Q_b - B_{bn}R_{12}.$$

Прохождение опоры, ориентированной вдоль касательной τ , восстанавливающая сила упругости которой пропорциональна поперечному смещению вдоль главной нормали n , выполняется аналогично и приводит к выводу следующих формул:

$$A'_{nn} = \frac{A_{nn}}{1 + A_{n\tau}c_{n\tau}}; \quad R_{13} = c_{n\tau} \cdot A'_{nn};$$

$$B'_{bn} = B_{bn} - B_{b\tau}R_{13}; \quad A'_{\tau n} = A_{\tau n} - A_{\tau\tau}R_{13}.$$

$$A'_{n\tau} = \frac{A_{n\tau}}{1 + A_{n\tau}c_{n\tau}}; \quad R_{14} = c_{n\tau} \cdot A'_{n\tau};$$

$$B'_{b\tau} = B_{b\tau}(1 - R_{14}); \quad A'_{\tau\tau} = A_{\tau\tau}(1 - R_{14}).$$

$$C'_{nb} = \frac{C_{nb}}{1 + A_{n\tau}c_{n\tau}}; \quad R_{15} = c_{n\tau} \cdot C'_{nb};$$

$$C'_{\tau b} = C_{\tau b} - A_{\tau\tau}R_{15}; \quad D'_{bb} = D_{bb} - B_{b\tau}R_{15}.$$

$$W'_n = \frac{W_n}{1 + A_{n\tau}c_{n\tau}}; \quad R_{16} = c_{n\tau} \cdot W'_n;$$

$$W'_{\tau} = W_{\tau} - A_{\tau\tau}R_{16}; \quad Q'_b = Q_b - B_{b\tau}R_{16}.$$

Прохождение опоры, восстанавливающий изгибающий момент которой ориентирован вдоль бинормали, а его величина пропорциональна продольному смещению вдоль оси τ .

Сначала рассмотрим изменение ПО при приложении единичной силы $N_n = 1$, направленной вдоль главной нормали n . В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме силы $N_n = 1$ будет действовать восстанавливающий изгибающий момент M_1 , направленный вдоль бинормали b ; его величина пропорциональна смещению вдоль оси τ , т.е. соответствующему ПО.

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$A'_{\tau n} = A_{\tau n}N_n - C_{\tau b}M_1; \quad \text{где } M_1 = c_{\tau b} \cdot A'_{\tau n}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

а) $A'_{\tau n} = \frac{A_{\tau n}}{1 + C_{\tau b}c_{\tau b}}$; б) $M_1 = c_{\tau b} \cdot A'_{\tau n}$;

в) $A'_{nn} = A_{nn} - C_{nb}M_1$; г) $B'_{bn} = B_{bn} - D_{bb}M_1$.

Теперь рассмотрим изменение ПО при приложении единичной продольной силы $N_{\tau} = 1$, направленной вдоль нейтральной оси. В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме силы $N_{\tau} = 1$, будет действовать восстанавливающий изгибающий момент M_2 , направленный вдоль бинормали b ; его величина пропорциональна смещению вдоль оси τ , т.е. соответствующему ПО.

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$A'_{\tau\tau} = A_{\tau\tau}N_{\tau} - C_{\tau b}M_2; \quad \text{где } M_2 = c_{\tau b} \cdot A'_{\tau\tau}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

а) $A'_{\tau\tau} = \frac{A_{\tau\tau}}{1 + C_{\tau b}c_{\tau b}}$; б) $M_2 = c_{\tau b} \cdot A'_{\tau\tau}$;

в) $A'_{n\tau} = A_{n\tau} - C_{\tau b}M_2$; г) $B'_{b\tau} = B_{b\tau} - D_{bb}M_2$.

Теперь рассмотрим изменение ПО при приложении единичного изгибающего момента $M_b = 1$, направленного вдоль бинормали. В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему кроме изгибающего момента $M_b = 1$ будет действовать восстанавливающий изгибающий момент M_3 , направленный вдоль бинормали b ; его величина пропорциональна смещению вдоль оси τ , т.е. соответствующему ПО.

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$C'_{\tau b} = C_{\tau b}(1 - M_3); \quad \text{где } M_3 = c_{\tau b} \cdot C'_{\tau b}.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПО будет:

$$а) C'_{\tau b} = \frac{C_{\tau b}}{1 + C_{\tau b} c_{\tau b}}; \quad б) M_3 = c_{\tau b} \cdot D'_{bb};$$

$$в) C'_{nb} = C_{nb}(1 - M_3); \quad г) D'_{bb} = D_{bb}(1 - M_3).$$

Теперь рассмотрим изменение ПП, отражающих действие на парциальную систему внешней нагрузки. В этом случае в опорном сечении на левую парциальную систему будет действовать восстанавливающий изгибающий момент M_4 , направленный вдоль бинормали b ; его величина пропорциональна смещению вдоль оси τ , т.е. соответствующему ПП.

В этом случае будут справедливы следующие соотношения:

$$W'_\tau = W_\tau - C_{\tau b} M_4; \quad \text{где } M_4 = c_{\tau b} \cdot W'_\tau.$$

Тогда комплект формул для расчета соответствующих ПП будет:

$$а) W'_\tau = \frac{W_\tau}{1 + C_{\tau b} c_{\tau b}}; \quad б) M_4 = c_{\tau b} \cdot W'_\tau;$$

$$в) W'_n = W_n - C_{nb} M_4; \quad г) Q'_b = Q_b - D_{bb} M_4.$$

Прохождение опоры, восстанавливающий изгибающий момент которой ориентирован вдоль бинормали b , а его величина пропорциональна смещению вдоль оси n , выполняется аналогично и приводит к выводу следующих формул:

$$A'_{nn} = \frac{A_{nn}}{1 + C_{nb} c_{nb}}; \quad M_5 = c_{nb} \cdot A'_{nn};$$

$$A'_{\tau n} = A_{\tau n} - C_{\tau b} M_5; \quad B'_{bn} = B_{bn} - D_{bb} M_5.$$

$$A'_{nr} = \frac{A_{nr}}{1 + C_{nb} c_{nb}}; \quad M_6 = c_{nb} \cdot A'_{nr};$$

$$A'_{\tau r} = A_{\tau r} - C_{\tau b} M_6; \quad B'_{br} = B_{br} - D_{bb} M_6.$$

$$C'_{nb} = \frac{C_{nb}}{1 + C_{nb} c_{nb}}; \quad M_7 = c_{nb} \cdot C'_{nb};$$

$$C'_{\tau b} = C_{\tau b}(1 - M_7); \quad D'_{bb} = D_{bb}(1 - M_7).$$

$$W'_n = \frac{W_n}{1 + C_{nb} c_{nb}}; \quad M_8 = c_{nb} \cdot W'_n;$$

$$W'_\tau = W_\tau - C_{\tau b} M_8; \quad Q'_b = Q_b - D_{bb} M_8.$$

Окончательный расчет параметров вибрации модифицированной модели судового корпуса на действие усилий $\bar{Q}^*(Q_\tau^*; Q_n^*)$ и M_b^* является расчетом второго этапа. Заметим, что если в других точках модели судового корпуса дополнительно действуют гармонически изменяющиеся с частотой ω внешние усилия, их учет должен быть выполнен так же, как это делалось в рамках не модифицированной модели [5].

В заключении хочется отметить, что предложенный метод позволяет решать задачи не только об установившихся колебаниях сопрягающихся конструкций, но и любые другие задачи, в которых влияние исследуемого фактора на параметры установившихся колебаний может быть представлено в виде дополнительной нагрузки, зависящей от параметров колебаний (например, влияние протекающей по трубопроводу жидкости, учет вращения гребного винта, учет вращения валопровода, учет продольной квазистатической нагрузки и т.п.).

Литература

1. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Квазиодномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования. СПб, Моринтех, 2019 г.
2. Чувиковский В.С. Численные методы расчетов в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1976, с.374.
3. Чувиковский В.С., Мелконян А.Л. Совместная вынужденная вибрация судового корпуса и его перекрытий. Л., журнал Судостроение. - 1986. №8. –стр. 5-6.
4. Мелконян А.Л. Математическая модель для исследования вибрации судового корпуса и конструктивного модуля с одним районом сопряжения малой протяженности. РУМБ, ДР-3253, 21.03.1990, сб. рефератов ДР, ВИМИ, вып. 8, 1990, 7с.
5. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Эффективное решение. Расчет изогнутых балок и рам.). 08.11.2018

References

1. Melkonian A.L., Nikolaev D.A. Kvaziodnomernie modeli dlia analiza parametrov vibratsii sudovogo korpusa na rannih stadiakh ego proektirovaniya [Quasi-one-dimensional models for the analysis of ship hull vibration parameters at early stages of its design]. SPb, Morintex, 2019 g.
2. Chuvikovskiy V.C. Chislennye metodi raschetov v stroitelnoy mehanike korablia [Numerical methods of calculations in ship construction mechanics]. L.: Sudostroenie, 1976, s 374.
3. Chuvikovskiy V.C., Melkonian A.L. Sovmestnaya vinugdannaya vibratsiya sudovogo korpusa i ego perekritiy [Joint forced vibration of the ship's hull and its overlaps]. L., gurnal Sudostroenie 1986 g. №8, str. 5-6.
4. Melkonian A.L. Matematicheskaya model dlia issledovaniya vibratsii sudovogo korpusa i konstruktivnogo modulja s odnim raionom sopriageniya maloy protyagennosti [A mathematical model for studying the vibration of a ship's hull and a structural module with a single short-range interface area]. RUMB, DR-3253, 21.03.1990, sb. Referatov DR, VIMI, vip. 8, 1990, 7 s.

5. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Effectivnoe reshenie. Raschet izognutih balok I ram [Effective solution for curved beams and frames]). 08.11.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мелконян Армен Леонович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, тел. (911) 911-64-25; e-mail: mel1950@mail.ru

Armen L. Melkonian, Ph.D. (Eng), professor, professor of theoretical mechanics and material strength department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya str., 190008 St. Petersburg, The Russian Federation, e-mail: mel1950@mail.ru

Николаев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, пенсионер, e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de

Dmitry A. Nikolaev Ph.D. (Eng), a pensioner e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.042

УДК 629.5.061

Обеспечение работоспособности главного электродвигателя и пирамидальной прочности пропульсивного комплекса судов ледового класса

А.В. Андрушин¹, К.Б. Хлыстова²¹АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация Новые проектируемые современные ледоколы и ледокольные суда, включая суда двойного действия (DAS), значительно выходят за рамки предыдущего опыта эксплуатации, что обуславливает необходимость разработки уточненных методов обеспечения работоспособности и надежности пропульсивного комплекса (ПК). На ПК (винто-рулевые колонки судов DAS) воздействуют интенсивные ледовые нагрузки, обусловленные использованием режимов движения задним ходом в ледовых условиях, ростом ледовой ходкости и операционных скоростей. Обеспечение прочности гребного винта (ГВ) и работоспособности главного электродвигателя (ГЭД) ПК являются одними из главных задач современного ледоколостроения, решение которых определяет операционную эффективность ледокольного судна во льдах. Авторами статьи разработана усовершенствованная методика, позволяющая спроектировать эффективный ГВ с высокими прочностными характеристиками, на основе имеющихся экспериментальных данных современных ледокольных судов. В статье представлены основные подходы методологии, разработанной авторами на базе лаборатории пропульсивных комплексов судов АО «ЦНИИМФ», для определения и регулирования ледовых нагрузок в системе ГВ – валопровод – ГЭД, расчета и снижения силы поломки лопасти ГВ и обеспечения принципа пирамидальной прочности.

Ключевые слова: ледокол, гребной винт, главный электродвигатель, ледовые нагрузки, сила поломки лопасти, судно двойного действия, винто-рулевая колонка

Ensuring the main electric engine operability and pyramidal strength of the propulsion system of ice ships

Alexandr V. Andrushin¹, Kseniia B. Khlystova²¹Central Marine Research and Design Institute (CNIIMF), Russian Federation, ²St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Nowadays an intensification of interest, and use, of arctic waters for shipping as well as a high demand for ice ships is widely observed. Modern ice ships projects (e.g. double-acting ships) go beyond previous operational and design experience significantly. Therefore, the improvement of calculation methods needs to be developed. Azimuth thruster propellers on DAS have to meet the demanding operating environments. Propeller strength and operability of the propulsion complex mainly influence the operational effectiveness of the modern icebreakers and ice ships. Deep analysis of past investigations devoted to propeller/ice interaction was fulfilled. It gives an opportunity to highlight the main factors determining the efficiency of ice propellers and to develop the advanced methods of propeller strength calculation. Modern operating experience as well as the refined methodologies are used to develop efficient ice propellers with high strength characteristics. The refined methods have been developed to assign and regulate ice loads for propulsion complexes design to calculate and reduce the damage force of the propeller blade and to ensure pyramid strength.

Key words: icebreaker, propeller, main electric engine, ice loads, blade damage force, DAS, azimuth thruster

Введение

Настоящее время отмечено интенсивным развитием арктического судостроения и судоходства. Активно проектируются новые ледоколы, современные танкера арктических классов и транспортные ледокольные суда, включая суда двойного действия (DAS) с винто-рулевыми колонками (ВРК). Новые суда выходят за рамки предыдущего опыта эксплуатации - интенсивное использование режимов движения задним ходом в ледовых условиях, рост ледовой ходкости и операционных скоростей приводит к увеличению интенсивности воздействия льда на пропульсивный комплекс (ПК), что обуславливает необходимость разработки уточненных методов обеспечения работоспособности и надежности ПК при проектировании и в эксплуатации.

Обеспечение прочности гребного винта (ГВ) и работоспособности главного электродвигателя (ГЭД) ПК являются одними из главных задач современного

ледоколостроения, решение которых определяет операционную эффективность ледокольного судна во льдах. В ледовых условиях при воздействии ледового момента на ГВ, ГЭД должен поддерживать заданную мощность, момент, скорость вращения ГВ для обеспечения тяги ПК, движения судна и предотвращения остановки (заклинки) ГВ и его поломки.

Основным принципом при проектировании ПК ледокольных судов является обеспечение пирамидальной прочности [1, 2]. Согласно принципу пирамидальной прочности, при поломке лопасти ГВ на нерасчетных режимах его взаимодействия со льдом все остальные элементы ПК в потоке силовых линий должны оставаться неповрежденными. Сила поломки лопасти является одним из основных параметров, который учитывается при проектировании ледокольного ПК.

Для решения указанных задач необходимо определение ледовых нагрузок на ГВ и ГЭД и разработка методов их снижения для реализации

преимуществ режимов заднего хода в ледовых условиях и повышения операционной ледовой ходкости, маневренности (эффektivности).

В статье представлены основные подходы методологии, разработанной авторами на базе лаборатории пропульсивных комплексов судов АО «ЦНИИМФ», для определения и регулирования ледовых нагрузок в системе ГВ – валопровод – ГЭД, расчета и снижения силы поломки лопасти ГВ и обеспечения принципа пирамидальной прочности.

1. Режимы взаимодействия ГВ со льдом и ледовые нагрузки

В качестве основного расчетного для назначения ледовых нагрузок принимается сценарий взаимодействия ГВ с обломком льда - фрезерование. Расчетные режимы (режимы фрезерования) льда реализуются при положительных углах атаки $\alpha \geq 0$ [3, 4]. В этом случае на лопасть ГВ воздействуют аксиальные отрицательная F_{ice}^- и положительная F_{ice}^+ нагрузки, а также сила профильного сопротивления T_{ice} .

$$F_{ice}^- = 10^3 [17.6 + 19.2e^{0.17\alpha(\bar{r}=0.9)}] \cdot K_{Sice} \cdot K_{Hice} \cdot D^{1.6} \cdot c_{mean} \cdot \sigma_{compr}(\bar{r} = 0.8) \quad (1)^1$$

$$F_{ice}^+ = K_f \cdot c(\bar{r} = 0.95) \cdot R \cdot \sigma_{compr}(\bar{r} = 0.8) \cdot k_{scale}(\bar{r} = 0.95) \cdot K_{Sice} \cdot \frac{H_{ice}}{R(1-r_{hub})} \quad (2)^1$$

Ледовая сила профильного сопротивления T_{ice} определяет момент сопротивления льда вращению гребного винта Q_{ice} .

$$Q_{ice} = k_{profile} \cdot [0.22515 + 30 \cdot \exp(-0.068 \cdot \alpha(\bar{r} = 0.8))] \cdot K_{Sice} \cdot K_{Hice} \cdot D^{2.6} \cdot t(\bar{r} = 0.8)^{0.5} \cdot \sigma_{compr}(\bar{r} = 0.8) \quad (3)^1$$

Воздействие ледового момента Q_{ice} уменьшает скорость вращения гребного винта и угол атаки лопасти. При малой скорости вращения ГВ и отрицательных углах атаки $\alpha < 0$ контакт со льдом распространяется по всей засасывающей поверхности лопасти. Последнее приводит к нерасчетным режимам взаимодействия ГВ со льдом - неконтролируемому (резкому) росту ледовой нагрузки на ГВ (включая ледовый момент на гребном винте) и ГЭД. Перегрузка ГЭД по моменту может привести к остановке ГВ и поломке его лопасти [5, 6]. Низкие значения углов атаки приводят к ледовым перегрузкам ГВ, которые могут инициировать деформацию лопастей и их преждевременное усталостное разрушение [7, 8]. На режимах реверса в тяжелых ледовых условиях может реализоваться ледовый удар «плашмя», который приводит к поломке лопасти. На режиме реверса поломка лопасти ГВ происходит без его нагружения ледовым моментом.

2. Обеспечения эксплуатационной прочности ГВ и работоспособности ГЭД

Обеспечение работоспособности ГЭД и предотвращение возникновения нерасчетных режимов взаимодействия ГВ со льдом обуславливает необходимость назначения его

предельного момента $(Q_{engine})_{lim}$ и диапазона скорости вращения ГВ, где поддерживается режим постоянной номинальной мощности, см. рис. 1. Предельный крутящий момент $(Q_{engine})_{lim}$ должен быть не менее, чем максимальный момент на валу $(Q_{total})_{max}$ (без крутильных колебаний).

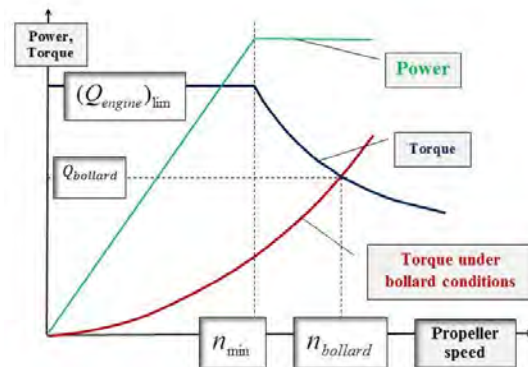


Рис. 1 Принципиальная схема мощности и крутящего момента ГЭД в зависимости от скорости вращения ГВ.

$$(Q_{engine})_{lim} \geq (Q_{total})_{max} \quad (4)$$

при $n \geq n_{min}$ при спецификационной мощности, где Q_{total} – суммарный момент на валу ГВ; $(Q_{total})_{max}$ – максимальное значение Q_{total} .

Суммарный момент на валу ГВ Q_{total} :

$$Q_{total} = Q_{hydr} + Q_{ice} - \theta \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5)$$

где Q_{hydr} - гидродинамический момент на гребном валу; Q_{ice} - среднее значение ледового момента на гребном валу, см. (3); n – скорость вращения ГВ; $\theta \frac{\partial n}{\partial t}$ - инерциальная составляющая крутящего момента; θ - момент инерции системы «ГЭД – гребной вал – ГВ»; t – текущее время процесса.

Если величина момента на валу $(Q_{total})_{max}$ превосходит $(Q_{engine})_{lim}$, ГЭД не поддерживает постоянной мощности, что приводит к резкому падению скорости вращения ГВ и может вызвать его остановку при взаимодействии со льдом. Эти ситуации крайне нежелательны, так как это приводит к сильному ограничению операционной скорости судна, а также к возможной поломке лопасти. Изложенное выше подтверждается эксплуатационным опытом ледоколов и крупнотоннажных ледокольных танкеров по данным АО «ЦНИИМФ».

Условие (4) может быть принято в качестве одного из критериев для предотвращения указанных нерасчетных режимов взаимодействия со льдом.

3. Обеспечение пирамидальной прочности ПК и расчет силы поломки лопасти ГВ

При эксплуатации ледокольного ГВ невозможно полностью избежать нерасчетных режимов (см. п. 1), например, реверса при экстренной остановке судна для предотвращения столкновения с ледоколом.

¹ Подробную расшифровку параметров и коэффициентов формул см. в статьях [3, 4].

Поэтому обеспечение пирамидальной прочности является основным принципом при проектировании пропульсивных комплексов ледокольных судов [1, 2, 9]. Согласно принципу пирамидальной прочности, при поломке лопасти ГВ на нерасчетных режимах его взаимодействия со льдом все остальные элементы ПК в потоке силовых линий должны оставаться неповрежденными. Такой подход позволяет сменить поврежденную лопасть на плаву и продолжить эксплуатацию судна в рамках спецификационных требований и требований класса. Сила поломки лопасти является одним из основных параметров, который учитывается при проектировании ледокольного ПК.

В судостроительной практике для расчета силы поломки лопасти используются нормативные методики Классификационных обществ [1, 2, 9]. Правила DNV GL более детально регламентируют назначение прочностных характеристик отливки, расчетного корневого сечения лопасти для определения силы поломки лопасти, что определяет их выбор для практического решения указанной задачи.

Расчетная формула правил DNV GL [2, 11.6.4] для предельной силы поломки лопасти:

$$F_{ex} = \frac{0.3ct^2\sigma_{ref}}{0.8D-2r} \quad (6)$$

где c, t - длина и толщина расчетного цилиндрического сечения; $\sigma_{ref} = 0.6\sigma_{0.2} + 0.4\sigma_u$, $\sigma_{0.2}, \sigma_u$ - максимальные значения предела текучести и временного сопротивления материала лопасти; D - диаметр гребного винта; r - радиус расчетного корневого сечения.

Формула (6) предполагает использование значений толщины и длины цилиндрического сечения лопасти ГВ (Рис. 2).

Анализ характерных поломок лопастей гребных винтов показывает, что разрушение лопасти происходит вдоль «прямого» корневого сечения (Рис. 3).



Рис. 2 Лопасть ГВ с цилиндрическим сечением

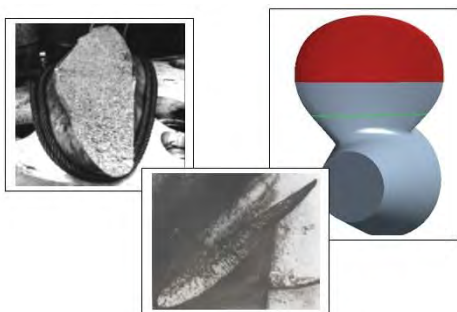


Рис. 3 Излом лопасти стального ГВ ледокола от воздействия одноразовой предельной нагрузки [7]

Дополнительно к требованиям классификационных обществ может быть выполнена уточненная оценка силы поломки лопасти ГВ с использованием геометрических характеристик «прямого» расчетного сечения (Рис. 3).

Уточненная оценка силы поломки лопасти может быть выполнена через предельный разрушающий момент по формуле (7) [10]:

$$Q_{damage} = 0.25 \cdot c_{root} \cdot t_{root}^2 \cdot \beta_{root}^{1.5} \cdot \sigma_{design} \quad (7)$$

где c_{root} - длина расчетного сечения излома лопасти; t_{root} - максимальная толщина сечения излома лопасти; β_{root} - коэффициент полноты сечения излома лопасти;

$$\sigma_{design} = \left[\sigma_{0.2} + \frac{2}{3}(\sigma_u - \sigma_{0.2}) \cdot (\bar{\epsilon}_{cr})_{max} \right] \quad (8)$$

где $\sigma_{0.2}$ - максимальный предел текучести материала лопасти; σ_u - максимальное временное сопротивление материала лопасти; $(\bar{\epsilon}_{cr})_{max} = 0.35$ - относительная величина максимальной критической упругопластической макродеформации материала в составе лопасти, при $\sigma_{0.2 min} \geq 0.6\sigma_{u min}$ (мартенситные стали) [1].

Формула для расчета силы поломки лопасти с разрушающим лопасть изгибающим моментом:

$$F_{damage} = \frac{Q_{damage}}{(0.8-r_{root}) \cdot 0.5D} \quad (9)$$

где, r_{root} - относительный радиус расчетного сечения излома лопасти – наиболее слабое корневое сечение $\approx \bar{r}_{hub} + 0.05$, где \bar{r}_{hub} - относительный радиус ступицы.

Также для оценки силы поломки лопасти выполнены расчеты МКЭ при упруго-пластическом деформировании. Расчетом МКЭ может быть уточнен r_{root} - относительный радиус расчетного сечения излома лопасти. Критерием поломки лопасти служит критическая упруго-пластическая деформация $(\epsilon_{cr})_{max}$ [10], соответствующая разрушению материала в составе лопасти, которая определена согласно нормативной процедуре РС Книге 20 [1], с учетом статистического анализа разброса прочностных характеристик материала исследуемого ГВ. Определяется по формуле (10) [1]:

$$(\epsilon_{cr})_{max} = (\bar{\epsilon}_{cr})_{max} \cdot (\delta_u)_{min} \quad (8)$$

где $(\delta_u)_{min}$ - минимальное относительное удлинение стандартного образца при одноосном растяжении, требуемое техническими условиями.

Представленные подходы применены для расчета силы поломки лопасти ГВ с использованием в качестве расчетного сечения как цилиндрического, так и «прямого» сечения излома лопасти. Проведен анализ и сравнение результатов расчетов силы поломки лопасти. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Пример уточненных расчетов силы поломки лопасти представлен для бортового ГВ ВРК судна DAS. Диаметр ГВ $D=4.3$ м. Материал ГВ сталь 06X15H4ДМЛ [1]. В настоящее время указанная сталь 06X15H4ДМЛ наиболее широко применяется для изготовления гребных винтов судов ледового плавания и ледоколов. Указанная сталь позволяет снизить толщины лопастей ГВ (толщины кромок лопастей ГВ) [3, 4] для снижения ледового момента на ГВ, обеспечивая их эксплуатационную прочность.

Таблица 1

Предельная разрушающая лопасть нагрузка для ГВ ВРК судна DAS, материал ГВ сталь 06Х15Н4ДМЛ

Расчет по аналитической формуле DNV GL (6) [2]	Расчет по формуле DNV GL (6) [2] с учетом «прямого» сечения излома лопасти ГВ (см. рис. 3):	Расчет по предельному изгибающему моменту, формула (9), для «прямого» сечения излома лопасти ГВ (см. рис. 3):	Расчет МКЭ при упруго-пластическом деформировании по критической упруго-пластической деформации
5560 кН	6530 кН	6530 кН	7016 кН

Заключение

Уточненный расчет силы поломки лопасти по представленным методикам для обеспечения принципа пирамидальной прочности показал увеличение значения разрушающей лопасть нагрузки на ~20% в сравнении с расчетом по аналитической формуле DNV GL с использованием цилиндрического расчетного сечения. Результаты расчета МКЭ коррелируются с величинами силы поломки лопасти ГВ при расчете по аналитическим формулам с использованием «прямого» сечения излома лопасти ГВ.

Анализ расчетов показал, что дополнительно к требованиям классификационных обществ необходимо использовать уточненные методы расчета, которые дают возможность более точно

оценить силу поломки лопасти при проектировании и обеспечить необходимые запасы прочности.

Учитывая опыт эксплуатации и результаты расчетов по уточненным формулам, а также расчет МКЭ, для назначения силы поломки лопасти ГВ при проектировании ПК необходимо учитывать характеристики «прямого» (реального) сечения излома лопасти ГВ (рис. 2). Следует отметить, что в рамках представленной методологии (см. п.1-2) авторами разработаны рекомендации [11] по снижению ледовых нагрузок на гребные винты и ГЭД, что позволяет снизить толщины лопастей ГВ. За счет корректировки толщин корневого сечения и формирования галтели гладким переходом переменного радиуса в месте соединения лопасти со ступицей возможно снижение силы поломки лопасти ГВ для обеспечения пирамидальной прочности ПК.

Литература

1. Проект новой редакции требований раздела 6 части VII “Механические установки” Правил Классификации и постройки морских судов // Сборник нормативно-методических материалов Книга 20. Российский морской регистр судоходства, 2010.
2. DNV GL Rules for classification: Ships, Part 6, Chapter 6 Cold climate, Section 5 Polar Class – PC. DNV GL, 2019.
3. Ледовые нагрузки на гребных винтах и обеспечение их прочности для судов активного ледового плавания с применением современных методов компьютерного моделирования / Хлыстова К.Б. [и др.] // Труды КГНЦ. Специальный выпуск 2. 2018. С. 44-52.
4. Хлыстова К.Б., Андрияшин А.В., Петров А.С. Особенности проектирования широколопастных гребных винтов судов ледового плавания и ледоколов // Труды КГНЦ. Специальный выпуск 1. 2019. С. 9-16.
5. Игнатьев М.А. Гребные винты судов ледового плавания. Л.: Судостроение, 1966. 116 с.
6. A.V. Andryushin, S. Hänninen, T. Heideman “Azipod” Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions // 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 13), Helsinki, Espoo, Finland, June 9-10, 2013, pp. 223-227
7. Андрияшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов: дис. ... доктора технических наук: 05.08.01 / С.-Петербург. гос. мор. техн. ун-т. Санкт-Петербург. 2007. 255 с.
8. Andryushin A.V. Ensuring of propeller strength for active ice going vessels and icebreakers (modern methods to ensure operation strength and efficiency of icebreaking propellers and propulsion complex under severe ice conditions). // Propeller Performance seminar. Lloyd’S Maritime Academy. London. Seminar documentation. 2012, 27-28 November.
9. Правила Классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства, 2019.
10. Требования к прочности механизма изменения шага – МИШ гребных винтов судов ледового плавания и ледоколов / Алферов В.И. [и др.] // Научно-Технический сборник РМРС. 2001. №24. С. 191-215.
11. Андрияшин А.В., Хлыстова К.Б. Проектирование ледокольных гребных винтов с пониженным уровнем ледовых нагрузок. Ледовые нагрузки, расчет прочности. // Труды КГНЦ. Специальный выпуск 1. 2020. С. 9-16.

References

1. Sbornik normativno-metodicheskikh materialov Kniga 20 [Collection of normative and methodological materials Book 20]. Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2010.
2. DNV GL Rules for classification: Ships, Part 6, Chapter 6 Cold climate, Section 5 Polar Class – PC. DNV GL, 2019.
3. Khlystova K.B., Andryushin A.V. [i dr.] Ledovye nagruzki na grebnykh vintakh i obespechenie ikh prochnosti dlia sudov aktivnogo ledovogo plavaniia s primeneniem sovremennykh metodov kompiuternogo modelirovaniia [Ice loads on propellers and ensuring their strength for active ice navigation ships using modern computer simulation methods]. Trudy KGNTc. Spetsialnyi vypusk 2. 2018. S. 44-52.

4. Khlystova K.B, Andriushin A.V., Petrov A.S. Osobennosti proektirovaniia shirokolopastnykh grebnykh vintov sudov ledovogo plavaniia i ledokolov [Design particularities of wide-bladed propellers of ice ships and icebreakers]. Trudy KGNTс. Spetsialnyi vypusk 1. 2019. С. 9-16
5. Ignatev M.A. Grebnye vinty sudov ledovogo plavaniia [Ice Propellers]. L.: Sudostroenie, 1966. 116 s.
6. A.V. Andryushin, S. Hänninen, T. Heideman "Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions // 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 13), Helsinki, Espoo, Finland, June 9-10, 2013, pp. 223-227
7. Andriushin A.V. Teoriia vzaimodeistviia grebnogo vinta so ldom. Obespechenie ekspluatatsionnoi prochnosti elementov propulsivnogo kompleksa sudov ledovogo plavaniia i ledokolov [The theory of propeller interaction with ice. Ensuring the operational strength of the elements of the propulsion complex of ice ships and icebreakers]: dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.08.01. S.-Peterb. gos. mor. tekhn. un-t. Sankt-Peterburg. 2007. 255 s.
8. Andryushin A.V. Ensuring of propeller strength for active ice going vessels and icebreakers (modern methods to ensure operation strength and efficiency of icebreaking propellers and propulsion complex under severe ice conditions). // Propeller Performance seminar. Lloyd'S Maritime Academy. London. Seminar documentation. 2012, 27-28 November.
9. Pravila Klassifikatsii i postroiki morskikh sudov [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2019.
10. Alferov V.I., Andryushin A.V. [i dr.] Trebovaniia k prochnosti mekhanizma izmeneniia shaga – MISH grebnykh vintov sudov ledovogo plavaniia i ledokolov [Requirements for the strength of the controllable pitch mechanism - CPP of the propellers of ice ships and icebreakers]. Nauchno-Tekhnicheskii sbornik RMRS. 2001. №24. S. 191-215.
11. Andriushin A.V, Khlystova K.B. Proektirovanie ledokolnykh grebnykh vintov s ponizhennym urovnem ledovykh nagruzok. Ledovye nagruzki, raschet prochnosti [Design of ice propellers with a reduced level of ice loads. Ice loads, strength calculation.]. Trudy KGNTс. Spetsialnyi vypusk 1. 2020. С. 9-16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Владиславович Андришин, доктор технических наук, заведующий лабораторией «Пропульсивные комплексы судов» АО «ЦНИИМФ», 191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 6А, e-mail: propulsionlab@cniimf.ru

Alexandr V. Andrushin, Dr. Sci. (Eng), head of Laboratory of the Propulsion Complexes of Ships CNIIMF, Lit. A, 6, Kavalergardskaya str., St. Petersburg, Russian Federation 191015, e-mail: propulsionlab@cniimf.ru

Ксения Борисовна Хлыстова, аспирант кафедры Теории корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kisel54321@gmail.com

Kseniia B. Khlystova, graduate student of the Department of ship theory, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kisel54321@gmail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.043

УДК 532.582.5

Метод учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей

А.Ю. Яковлев¹, Тхант Зин¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Учет масштабного эффекта имеет важное значение для задач проектирования судов и их движителей. Сложные формы корпусов судов и современных движителей могут быть представлены в виде комбинации простых базовых элементов, одним из которых является гидродинамический профиль. В работе представлен метод учета масштабного эффекта для плоского гидродинамического профиля. Метод учета основан на численной оценке характеристик профиля с помощью методов идеальной жидкости и расчета пограничного слоя. В методе моделируются эффекты ламинарно-турбулентного перехода и отрыва пограничного слоя, учитывается возможность турбулизации и присоединения пограничного слоя в случае его ламинарного отрыва. Моделирование масштабного эффекта осуществляется путем выбора значений ряда параметров масштабирования из условия согласования расчета с модельными экспериментальными данными, специальной аппроксимации невязки между ними по методу наименьших квадратов и последующего расчета на большие натурные числа Рейнольдса. Показаны особенности влияния параметров масштабирования на характеристики профиля. Эффективность разработанного метода подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными.

Ключевые слова: аэродинамический профиль, подъемная сила, сопротивление, масштабный эффект, численный метод, пограничный слой.

Scale effect evaluation method of hydrofoil sections

Aleksey Yu. Yakovlev¹, Thant Zin¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Taking into account the scale effect is important for the design of ships and its propulsors. Complex shapes of ship hulls and modern propulsors may be represented as a combination of simple basic elements. The hydrodynamic profile is one of its. This paper presents a method of accounting for the scale effect for the special case of a plane aerodynamic profile. The method of accounting is based on the numerical evaluation of the profile characteristics using the methods of ideal fluid and boundary layer calculation. The method simulates the effects of laminar-turbulent transition and separation of the boundary layer. The possibility of turbulization and joining of the boundary layer in the case of its laminar separation is taken into account. Modeling of the scale effect is carried out by selecting the values of a few scaling parameters. The values are determined from the achievement of convergence the calculation results and the model experimental data. The features of the influence of scaling parameters on the profile characteristics are shown. The next steps of scaling are special least squares approximation of the residuals between calculation results and experimental data and calculation of the hydrofoil characteristics at large full-scale Reynolds numbers. The effectiveness of the developed method is confirmed by comparison with experimental data

Key words: airfoil section, lifting force, drag, scale effect, calculation method, boundary layer.

Введение

В механике и ряде других наук известна проблема масштабного эффекта. Под масштабным эффектом традиционно понимают различие между безразмерными характеристиками модели и натурального объекта. Причиной возникновения масштабного эффекта является нарушение условий механического подобия. В гидромеханике признаком нарушения подобия служит различие модельных и натуральных чисел подобия. На практике наибольшие сложности вызывает моделирование по числу Рейнольдса и именно с ним связана проблема учета масштабного эффекта.

Учет масштабного эффекта чрезвычайно важен для практических задач судостроения. Поэтому разработаны и успешно применяются реализующие его методики для различных приложений [1]. Однако в связи с ростом требований к точности разработок и переходом к решению комплексных задач стала очевидной необходимость совершенствования подобных методик [2]. Основным инструментом такого совершенствования, по мнению большинства специалистов, должны служить вычислительные методы гидромеханики. При этом существуют два подхода. В одном из них упор делается на

повышение точности расчетов, что в итоге, должно привести к непосредственной расчетной оценке натуральных характеристик [3], [4]. К сожалению, современные CFD-методы пока не могут решить эту задачу.

Для получения достоверных оценок масштабного эффекта развиваются специальные методы, позволяющие на основе расчетных оценок и теоретических соотношений пересчитать результаты модельных испытаний на натуре. В ряде подобных методов используется переход к анализу масштабного эффекта для плоских сечений моделируемых объектов, например судовых движителей [5], [6]. Однако, в этих схемах зачастую используются крайне упрощенные теоретические соотношения, не учитывающие ряд важных особенностей течения которые, как показывает практика, могут существенно сказываться на результатах.

1. Постановка задачи

Корпуса судов, объекты морской техники, их выступающие части и движители, имеют сложную форму, которая, как правило, может быть представлена в виде комбинации простых базовых элементов. Одним из таких элементов является

гидродинамический профиль. Разработав метод учета масштабного эффекта для профиля, в дальнейшем можно развивать методы учета масштабного эффекта для более сложных объектов.

Таким образом, в качестве цели работы выступает разработка метода учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей на основе простых математических моделей, учитывающих ключевые особенности физических явлений. Наличие в этих моделях ограниченного числа свободных эмпирических параметров должно позволить настроить математическую модель исходя из согласования с имеющимися экспериментальными данными при модельных числах Рейнольдса и потом проводить расчет для натуральных чисел Рейнольдса.

Число Рейнольдса для профиля вводится традиционным образом:

$$Re = \frac{V_{\infty} C}{\nu} \quad (1)$$

где V_{∞} – скорость набегающего потока, C – длина хорды профиля, ν – коэффициент вязкости.

При реализации метода учета масштабного эффекта предполагается, что имеются результаты модельных испытаний при нескольких значениях Re , лежащих в диапазоне $10^4 - 10^6$. На основании этих данных необходимо оценить характеристики профиля при больших числах Рейнольдса, имеющих порядок $2 \cdot 10^6 - 10^7$ и выше.

Ранее был разработан полуэмпирический метод расчета гидродинамических характеристик профиля, позволяющий получать достоверные результаты в широком диапазоне чисел Рейнольдса [7], [8]. Для достижения поставленной цели необходимо выбрать и теоретически обосновать параметры, обеспечивающие согласование расчета по этому методу с результатами модельных испытаний, а также разработать метод обработки и пересчета этих результатов на натурные условия.

2. Метод расчета гидродинамических характеристик профиля

В качестве базового метода расчета обтекания профиля используется метод граничных уравнений [9], дающий решение в невязкой жидкости. Для учета процессов, обусловленных вязкостью жидкости, используются соотношения, полученные в [7], [8] на основе теории пограничного слоя [10].

Коэффициент сопротивления профиля определяется, согласно [7], следующим образом:

$$C_D = 1,34 \sqrt{\frac{S_t}{Re} \int_0^1 \frac{|\bar{V}|^{4,35}}{S_0} dS} + \frac{0,0306}{\sqrt[3]{Re}} \left(\int_0^1 \frac{|\bar{V}|^{3,545}}{S_t} dS \right)^{\frac{6}{7}} \quad (2)$$

где \bar{V} – скорость на внешней границе пограничного слоя профиля, отнесенная к скорости V_{∞} , S – координата, отсчитываемая от передней критической точки, вдоль поверхности профиля. Индекс: t соответствует точке ламинарно-турбулентного перехода, 0 – передней критической точке, 1 – выходящей кромке.

Величина S_t , определяется из условия ламинарно-турбулентного перехода [8]:

$$\ln \left(Re \cdot \bar{V}_t \cdot \bar{\delta}_t^{**} \right) = 18,4 \cdot H_{32} - 21,74 - 0,36 \cdot \rho - \varepsilon^* \quad (3)$$

где ρ – шероховатость поверхности профиля, ε^* – параметр, учитывающий характеристики турбулентности потока, $\bar{\delta}_t^{**}$ – толщина потери импульса в точке ламинарно-турбулентного перехода, отнесенная к C , H_{32} – формпараметр.

Величины $\bar{\delta}_t^{**}$ и H_{32} определяются согласно [8]. Кроме того, согласно [8], считаем, что отрыв ламинарного пограничного слоя сопровождается переходом к турбулентному течению и последующим присоединением пограничного слоя к поверхности профиля, в том случае, если:

$$1,34 \cdot \sqrt{\frac{|\bar{V}|}{Re} \int_0^1 \frac{|\bar{V}|^{4,35}}{S_0} dS} > f_0^* \quad (4)$$

где f_0^* – эмпирическое значение формпараметра.

Коэффициент подъемной силы профиля, согласно [8], определяется следующим образом:

$$C_L = \left(\frac{dC_Y}{d\alpha} \right)_I \cdot [\alpha - \Delta\alpha - \alpha_{0I}] \quad (5)$$

где $(dC_L/d\alpha)_I$ – наклон кривой подъемной силы в идеальной жидкости, α_{0I} – угол нулевой подъемной силы по данным расчета в идеальной жидкости, $\Delta\alpha = \Delta\alpha(\alpha, Re)$ – поправка на вязкость, зависящая от угла атаки профиля α и числа Рейнольдса.

Поправка $\Delta\alpha$ определяется на основе расчета пограничного слоя [8] в том числе и на режимах отрывного обтекания при углах атаки близких к критическому. Математическая модель развития отрывного обтекания [10] содержит свободный параметр L_s – протяженность области формирования отрыва.

Увеличение угла атаки профиля свыше критического приводит к формированию за профилем застойной зоны. Для моделирования этого режима обтекания используется модифицированная формула Рэлея для плоской пластины, обтекаемой со срывом струй [11]:

$$C_N = \frac{2\pi \sin(\alpha)}{4 + \pi \sin(\alpha)} \left[1,0 + \sigma + \frac{\sigma^2}{8(\pi + 4)} \right] \quad (6)$$

где σ – коэффициент давления, соответствующий давлению в застойной зоне, зависящий от угла атаки и формы профиля.

3. Параметры масштабирования

Под параметрами масштабирования понимаются параметры, входящие в представленный выше расчетный метод и определяемые по результатам сопоставления с данными модельных испытаний. Как следует из представленного выше описания расчетного метода, к числу таких параметров могут быть отнесены: f_0^* , ε^* , L_s и σ .

Величины f_0^* , ε^* оказывают влияние на момент наступления ламинарно-турбулентного перехода. Эти величины должны определяться из условия согласования расчетной зависимости коэффициента сопротивления профиля от числа Рейнольдса с экспериментальными данными при нулевом угле атаки. В этом случае параметры f_0^* , ε^* косвенно определяют специфику конкретной экспериментальной установки и условий проведения эксперимента. Роль параметра f_0^* состоит в

сглаживании скачка коэффициента сопротивления, а параметр ϵ^* изменяет положение этого скачка.

Параметр ϵ^* может трактоваться как характеристика степени турбулентности потока. Действительно рассмотрим известный эксперимент [12] в рамках которого были получены различные распределения коэффициента трения C_f на поверхности плоской пластины при различной степени турбулентности потока. Поскольку на пластине отсутствует градиент давления, параметр f^*_0 в данной задаче может быть исключен из рассмотрения и все различия должны моделироваться за счет изменения ϵ^* . Для согласования расчета с экспериментом при турбулентности потока равной 3% и 6% потребовалось задать величины ϵ^* равные 2,5 и 5, соответственно (рис. 1). Полученные в результате кривые практически точно ложатся на экспериментальные данные.

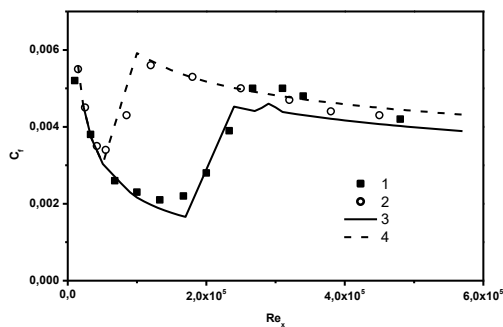


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента трения на поверхности пластины при различной степени турбулентности потока. 1-эксперимент ТЗА (3%), 2 – эксперимент ТЗВ (6%), 3 – расчет ТЗА, 4 – расчет ТЗВ.

В отличие от плоской пластины, на профилях имеет место отрыв пограничного слоя и поэтому необходимо использовать два параметра масштабирования f^*_0 , ϵ^* . Пример подбора этих параметров для согласования с экспериментом [13] и [14] приведен на рис. 2 (сопоставление с большим числом экспериментов представлено в [8]). Для согласования с данными [13] были выбраны параметры: $f^*_0 = -0,22$ и $\epsilon^* = -0,10$, а для согласования с данными [14]: $f^*_0 = -0,11$ и $\epsilon^* = 0,35$. В результате подбора параметров f^*_0 и ϵ^* удалось добиться хорошего совпадения расчета с каждой группой испытаний.

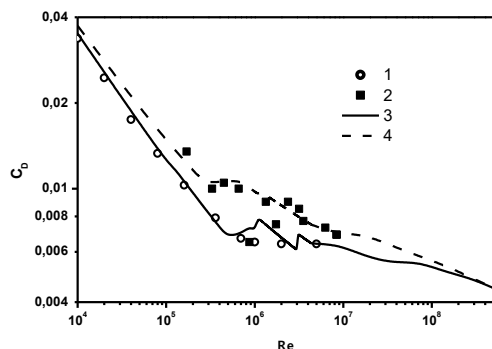


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости C_D от Re для профиля NASA0012 при нулевом угле атаки. Экспериментальные данные: 1 – [13], 2 – [14], 3 – расчет, согласованный с данными [13], 4 – расчет, согласованный с данными [14].

Параметры L_s и σ позволяют согласовать расчет с модельным экспериментом в области отрывного обтекания. Причем параметр L_s оказывает заметное влияние на величину критического угла атаки (см. рис. 3), а его выбор обеспечивает хорошее согласование расчета и эксперимента.

Таким образом, за счет подбора параметров f^*_0 , ϵ^* , L_s и σ производится настройка расчетного метода. После выполнения настройки можно проводить расчет для натуральных чисел Рейнольдса. При этом оказывается, что натурные оценки слабо зависят от выбранных величин параметров. Так, например, на рис. 1, 2, 3 видно, что расчетные кривые, полученные при различных параметрах f^*_0 , ϵ^* , L_s при больших числах Рейнольдса практически совпадают. Параметр L_s для натуральных условий можно брать порядка 0,5, а величину σ определять на основе соотношений рекомендованных в [11].

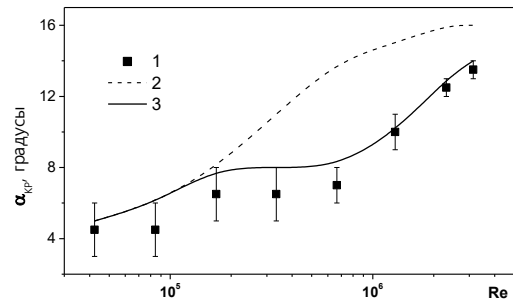


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных величин критических углов атаки для профиля NASA0009 в зависимости от Re . 1- эксперимент [14], 2 – расчет при фиксированном L_s , 3 – расчет с подбором L_s .

4. Обработка экспериментальных данных

Результаты модельных испытаний обычно представляют в виде наборов величин коэффициентов подъемной силы и сопротивления профиля от угла атаки при ряде значений числа Рейнольдса. В силу особенностей проведения экспериментов всегда существуют определенные разбросы этих величин. Для прогнозирования натуральных характеристик на основе подобных наборов данных следует провести их обработку и получить аппроксимационные зависимости.

В данном методе применяется следующий подход к обработке данных модельного эксперимента. Расчеты проводятся на всех режимах, соответствующих имеющимся экспериментальным данным. Определяются одинаковые для всех расчетов параметры масштабирования, обеспечивающие наилучшее согласование расчетов с экспериментами. Далее вычисляется невязка между расчетом и экспериментом для коэффициентов подъемной силы: Δ_L и сопротивления: Δ_D

$$\Delta_L = C_{Lcalc} - C_{Lexp} \quad (7)$$

Где calc обозначает расчетные величины, а exp – результаты модельных экспериментов. Индекс L соответствует коэффициенту подъемной силы, для коэффициента сопротивления формула аналогична.

Полученная невязка зависит от угла атаки профиля и числа Рейнольдса. Зависимость от угла атаки не позволяет выделить закономерность в поведении невязки, для этого строится зависимость

невязки от параметра S_σ , характеризующего отстояние точки начала области постоянства давления при отрывном обтекании от носика профиля. Картины течения при одинаковых S_σ оказываются подобными, хотя и происходят при разных углах атаки и числах Рейнольдса. В результате удается получить закономерность поведения невязки для всех режимов обтекания профиля.

Далее производится аппроксимация полученных невязок в пределах определенного интервала S_σ и во всем диапазоне чисел Рейнольдса. Аппроксимация осуществляется по методу наименьших квадратов функциями следующего вида:

$$\varphi(S_\sigma, Re) = a_0 + a_1 \cdot \frac{S_\sigma - S_{\sigma 0}}{\Delta S_{\sigma 0}} + a_2 \cdot \frac{1}{Re} \quad (8)$$

где a_i – коэффициенты аппроксимации, $S_{\sigma 0}$ – точка в окрестности которой производится аппроксимация по S_σ , $\Delta S_{\sigma 0}$ – ширина интервала, в котором производится аппроксимация.

При аппроксимации используется весовая функция $\mu = Re^n$ ($n > 1$). Такое задание весовой функции позволяет повысить точность аппроксимации при больших числах Рейнольдса.

Для определения невязки при натуральных числах Рейнольдса необходимо знать только зависимость коэффициента a_0 от S_σ . Окончательные значения характеристик натурального профиля определяются следующим образом

$$C_{Lnat} = C_{Lcalc} - a_0(S_\sigma) \quad (9)$$

5. Пример учета масштабного эффекта

Разработанный метод учета масштабного эффекта был применен для пересчета результатов испытаний ряда профилей [14]. В качестве примера рассмотрим профиль NACA0015. Для него в качестве модельных результатов были использованы зависимости C_D и C_L от угла атаки при $Re = 42,9 \cdot 10^3$, $84 \cdot 10^3$, $166 \cdot 10^3$, $331 \cdot 10^3$, $655 \cdot 10^3$. Сопоставление результатов пересчета с экспериментальными данными при $Re = 3,26 \cdot 10^6$, представлено на рис. 4. На этом же рисунке приведены экспериментальные данные при малом числе Рейнольдса, что позволяет оценить изменения характеристик профиля при

учете масштабного эффекта. Расчеты для других профилей показали аналогичные результаты.

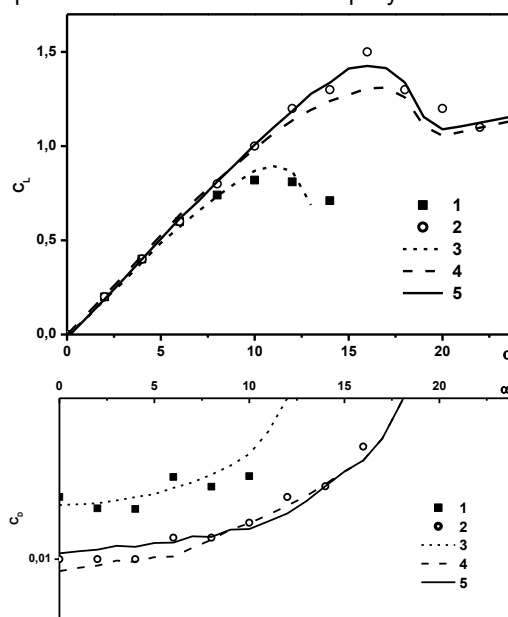


Рис. 4. Учет масштабного эффекта для профиля NACA0015. Эксперимент: 1 – $Re = 84 \cdot 10^3$, 2 – «натурный» $Re = 3,26 \cdot 10^6$ («натурный»). Расчет: 3 – $Re = 84 \cdot 10^3$, 4 – $Re = 3,26 \cdot 10^6$. 5 – пересчет.

Заключение

Масштабный эффект для аэродинамического профиля существенно зависит от соотношения величин модельного и натурального чисел Рейнольдса и не может быть учтен простым введением поправочного множителя.

Для учета масштабного эффекта на профиле разработан быстродействующий численный метод, основанный на расчете обтекания профиля идеальной жидкостью, анализе течения в пограничном слое и введении системы корректирующих коэффициентов, учитывающих результаты модельных испытаний.

Эффективность разработанного метода учета масштабного эффекта подтверждена путем сопоставления с экспериментальными данными при больших числах Рейнольдса.

Литература

1. Propulsion Committee of 27th ITTC 2014. '1978 ITTC Performance Prediction Method'. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Effective Date 2014, Revision 03.
2. Final Report and Recommendations to the 28th ITTC. The propulsion committee // Proceedings of 28th ITTC, Wuxi, 2017.
3. Bulten N., Stoltenkamp P. Full scale CFD: the end of the Froude-Reynolds battle // Fifth International Symposium on Marine Propulsion SMP'17, Espoo, Finland, June 2017
4. Лобачев М.П., Овчинников Н.А., Таранов А.Е., Чичерин И.А., Масштабный эффект в задачах судостроения – современные возможности оценки, Суперкомпьютерные дни в России 2016, стр. 232-244, 2016 г.
5. Helma S., Streckwall H., Richter J. The effect of propeller scaling methodology on the performance prediction // Fifth International Symposium on Marine Propulsion SMP'17, Espoo, Finland, June 2017
6. Quereda R., Soriano C., Perez-Sobrino M., Gonzalez-Adalid J., Moran A., Gennaro G. Scale effects in open water test results for performance prediction of conventional and unconventional propellers // Publication of Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial, CEHIPAR, El Pardo, Publ. num. 215, p. 36, Madrid, Abril 2016.
7. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Расчетно-эмпирический метод оценки сопротивления гидродинамических профилей в широком диапазоне чисел Рейнольдса, Морские интеллектуальные технологии, 2(44), т. 1, 2019, с. 21 – 25
8. Яковлев А.Ю., Тхант Зин Полуэмпирический метод оценки характеристик гидродинамических профилей // Морские интеллектуальные технологии, № 4, т. 1, 2019, с. 29 - 33.

9. Амромин Э.Л., Васильев А.В. К расчетам потенциального обтекания плоского профиля вихревым методом // Вопросы судостроения, Серия Проектирование судов, вып. 23, 1980
10. Елизаров А. М., Ильинский Н. Б., Поташев А. В. Обратные краевые задачи аэрогидродинамики. - М.: Наука. Издательская фирма "Физико-математическая литература", 1994.
11. Яковлев А.Ю. Численное моделирование и проектирование новых типов движителей. Труды Крыловского ГИЦ, 387, 2019, с. 32-50.
12. Coupland, J. 'T3A and T3B Test Cases'. ERCOFTAC Special Interest Group on Laminar to Turbulent Transition and Retransition, A309514, 1990.
13. Sheldahl R.E., Klimas P.C. Aerodynamical Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines // Report of SNL and Livermore under Contract DE-ACO4-76DP00789, USA, March 1981.
14. Jacobs E.N., Sherman A. Airfoil section characteristics as affected by variations of the Reynolds number, National advisory committee for aeronautics, Report No. 586, 1939.

References

1. Propulsion Committee of 27th ITTC. 1978 ITTC Performance Prediction Method. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Effective Date 2014, Revision 03, 2014.
2. Final Report and Recommendations to the 28th ITTC. The propulsion committee, Proceedings of 28th ITTC, Wuxi, 2017.
3. Bulten N., Stoltenkamp P. Full scale CFD: the end of the Froude-Reynolds battle, Fifth International Symposium on Marine Propulsion SMP'17, Espoo, Finland, 2017.
4. Lobachev M., Ovchinnikov N., Taranov A., Chicherin I. Mashtabnyy effect v zadachah sudostroeniya – sovremennye vozmozhnosti otsenki [Scale effect in shipbuilding tasks and modern evaluation opportunity], Supercomputer days in Russia, 2016, pp. 232 – 244.
5. Helma S., Streckwall H., Richter J. The effect of propeller scaling methodology on the performance prediction, Fifth International Symposium on Marine Propulsion SMP'17, Espoo, Finland, 2017.
6. Quereda R., Soriano C., Perez-Sobrinio M., Gonzalez-Adalid J., Moran A., Gennaro G. Scale effects in open water test results for performance prediction of conventional and unconventional propellers, Publication of Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial, CEHIPAR, El Pardo, Publ. num. 215, p. 36, Madrid, 2016.
7. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Raschetno-empiricheskiy metod otsenki soprotivleniya gidrodinamicheskikh profilyev v shirokom diapazone chisel Reynoldsa [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections drag in wide range of reynolds number], Marine intellectual technology, 2(44), vol.1, 2019, pp. 21 – 25.
8. Yakovlev A. Yu., Thant Zin Poluempiricheskiy metod otsenki harakteristik gidrodinamicheskikh profiley [Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil sections characteristics], Marine intellectual technology, 4(46), vol.1, 2019, pp. 29 – 33.
9. Amromin E.L., Vasilyev A.V. K raschetam potentsialnogo obtekaniya ploskogo profilya vihrevim metodom [Calculations of the potential flow around the flat wing section by the vortex method], Shipbuilding questions, ser. Ship design, v. 23, 1980.
10. Elizarov A.M., Ilyinskiy N.B., Potashev A.V. Obratniye kraevyye zadachi aerogidrodinamiki [Inverse boundary value problems of Aerohydrodynamics], Moscow, "Nauka", "Physic&Mathematic literature", 1994.
11. Yakovlev A. Yu. Chislennoe modelirovaniye I proektirovaniye novih tipov dviziteley [Numerical modeling and design of a new propulsors], Transactions of the KSRC, 387, 2019, pp. 32 - 50.
12. Coupland, J. T3A and T3B Test Cases. ERCOFTAC Special Interest Group on Laminar to Turbulent Transition and Retransition, A309514, 1990.
13. Sheldahl R.E., Klimas P.C. Aerodynamical Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines, Report of SNL and Livermore under Contract DE-ACO4-76DP00789, USA, 1981.
14. Jacobs E.N., Sherman A. Airfoil section characteristics as affected by variations of the Reynolds number, National advisory committee for aeronautics, Report No. 586, 1939.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Юрьевич Яковлев, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Тхант Зин, аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Aleksey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Head of Hydrodynamic and marine acoustic department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

Thant Zin, Postgraduate student of Hydrodynamic and marine acoustic department, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kgm@smtu.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.045
УДК 632.151: 629.5.017.2/ .015.24

Определение EEDI_{weather} при продольной качке судна с крыльевыми устройствами в репрезентативном состоянии моря

Зин Мин Хтет¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье предлагается индекс энергетической эффективности (EEDI) контейнеровоза на встречном волнении. Поскольку EEDI является мерой выбросов CO₂ из судов в спокойной воде, которая редко встречается в океане, ИМО определила EEDI для «репрезентативных морских условий» под названием EEDI_{weather}. При расчете EEDI_{weather} рассчитаны не только для простого судна, но и для судна с крыльевыми устройствами, движимого полностью или частично за счет использования энергии волнения. Энергосберегающее судно с крыльевыми устройствами способствует направленному влиянию на его продольную качку с целью уменьшения амплитуд качки и снижает дополнительное сопротивление на волнении. Продольная качка судна заданного типа, обводов и размерений на заданном регулярном волнении рассчитывается на основе совместных уравнений вертикально-килевой качки. EEDI_{weather} зависит от дополнительных сопротивлений на встречных ветрах и волнах, таким образом, судно с крыльевыми устройствами оказывает влияние уменьшения EEDI_{weather} в репрезентативных морских условиях. В ходе расчетов демонстрируется влияние на EEDI_{weather} удлинения и площади энергосберегающих крыльев, а также эффект реализации EEDI_{weather} при совместном использовании носового и кормового крыльев по сравнению со случаем использования только одного (носового или кормового) крыла. Результаты снижения EEDI_{weather} связаны с главной целью статьи о количестве вредных выбросов в атмосферу и с обеспечением защиты окружающей морской среды путем использования концепции «Зеленого судна».

Ключевые слова: EEDI, EEDI_{weather}, ИМО, дополнительное сопротивление, движители типа «машущее крыло», продольная качка судна, зелёное судно.

The determination of EEDI_{weather} during the longitudinal motion of a ship with wing devices in a representative sea condition

Zin Min Htet¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Proposed in this paper is the Energy Efficiency Design Index (EEDI) of a container ship on a head sea. Since EEDI is a measure of CO₂ emissions of ships in calm waters, which are rarely found in the ocean, IMO has defined EEDI for a “representative marine environment” called EEDI_{weather}. When calculating the EEDI_{weather}, not only a ship but also a ship with wing devices fully or partially propelled through the use of wave energy is calculated. An energy-saving ship with wing devices contributes to the directional influence on its longitudinal motion to reduce motion amplitudes and reduces additional resistance on waves. The longitudinal motion of a ship of given type, geometry, and dimensions on prescribed regular waves are determined to utilize numerical solutions of coupled equations of a ship pitching and heaving. The EEDI_{weather} is dependent on additional resistances on headwinds and waves, so a ship with wing devices has the effect of reducing the EEDI_{weather} in representative sea conditions. Demonstrated in the calculations is the influence upon the EEDI_{weather} of the aspect ratio and reference area of the wings, and also the effect of using simultaneously the bow and stern wings as compared to using just one (bow or stern) wing. EEDI_{weather} reduction results are related to the main goal of the article to the number of harmful emissions into the atmosphere and to ensure the protection of the marine environment through the use of the “Green Ship” concept.

Key words: EEDI, EEDI_{weather}, IMO, added resistance, “flapping-wing” propulsors, longitudinal ship motion, green ship.

Введение

EEDI (индекс энергетической эффективности) для новых судов является единственной наиболее важной технической мерой, направленной на содействие использованию более энергоэффективного оборудования и двигателей. EEDI требует минимального уровня энергоэффективности на миллю пропускной способности (например, тонная миля) для различных типов судов и сегментов их размеров. Показатель объединяет несколько важных точек зрения различных наук о судне: теории проектирования судов, теории корабля, экономики и экологии.

Международная морская организация (ИМО) сделала это обязательным для новых судов в 2011[1] году в качестве средства уменьшения углеродного следа от судоходства.

Для самых больших судов, таких как танкеры свыше 20 000 тонн и контейнеровозы свыше 15 000 тонн, EEDI нужен для того, чтобы определить количества CO₂, образуемого в процессе эксплуатации судов. Он будет применяться к судам, построенным после 1 января 2013 года, и потребует повышения эффективности на 10% для судов, построенных в 2015-2019 годах, на 20% - в 2020-2024 годах, и на 30% - с 2025 года.

Поскольку EEDI является мерой выбросов CO₂ судов в спокойной воде, которая редко встречается в океане. ИМО определила EEDI для «репрезентативных морских условий» под названием EEDI_{weather} [2], которая определяется путем деления EEDI по коэффициенту потери скорости из-за волн и ветра. Репрезентативное состояние моря, которое будет использоваться при расчете EEDI_{weather}, - встречный ветер и волны [3].

В настоящей работе рассматриваются EEDI, EEDI_{weather}, выбросов CO₂ по требованию ИМО. При расчете EEDI_{weather} рассчитаны не только судно, но и судно с крыльевыми устройствами, движимого полностью или частично за счет использования энергии волнения показано на рис 1.

1. Индекс энергетической эффективности (EEDI) контейнеровоза

На рисунке 2 представлены выбросы CO₂ по типам судов за 2012 год [4], самым высоким выбросом CO₂ из которых обладал контейнеровоз. Судно, изученное в настоящей работе, является контейнеровозом, характерные величины которого приведены в таблице 1.

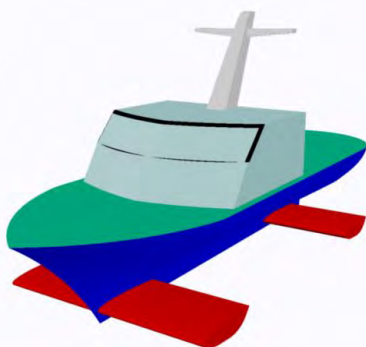


Рис 1. Энергосберегающее судна с крыльевыми устройствами

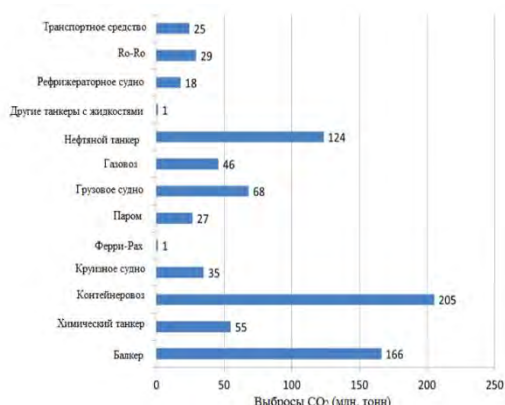


Рис 2. Выбросы CO₂ от международных перевозок по типу судна 2012 [4]

Таблица 1

Характерные величины контейнеровоза S-175

№	Наименование	Символ	ед.измерения	S-175
1.	Длина	L	м	175
2.	Ширина	B	м	25,4
3.	Осадка	T	м	9,5
4.	Высота борта	H	м	15,4
5.	Водоизмещение	∇	м ³	24742
6.	Коэффициент полноты	δ	-	0,559

	водоизмещение			
7.	Коэффициент мидельшпангоута	β	-	0,974
8.	Дедвейт судна	DWT	т	14827,8
9.	Главный двигатель	MAN B&W	-	G60ME-C9
10.	Эффективный удельный расход топлива	BSFC	г/кВт.ч	167

По данным [5] для проведения сравнительного анализа / оценки эффективности судна используются некоторые индексы: показатель расхода топлива (FCI), который измеряется в г / т.узлы (грамм топлива на тонну за морскую милю), определяется как количество топлива, потребляемого судном на тонну веса, переносимого на единицу пройденного расстояния.

$$FCI = \frac{\text{мощность} \times BSFC}{\text{переносимый груз} / \text{скорость судна}} \quad (1)$$

где BSFC – эффективный удельный расход топлива, г/кВт.ч.

Интенсивность CO₂(CO₂I), которая измеряется в г / т.узлы (грамм CO₂ за тонну на морскую милю), определяется как количество CO₂, производимого судном при транспортировке одной тонны веса на единицу пройденного расстояния.

$$CO_2I = 3,65 \times C_{fuel} \times FCI \quad (2)$$

По данным [6] C_{fuel} может получить из табл.2.

Таблица 2

Содержание углерода топливо

Тип топлива	Источник	Содержание углерода	C _{fuel}
Дизельное топливо / газойль	ISO 8217 ранги DMX через DMB	0,8744	3,206
Легкое мазут	ISO 8217 ранги RMA через RMD	0,8594	3,151
Тяжелое топливо	ISO 8217 ранги RME через RMK	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ	Пропан	0,8182	3
	Бутан	0,8264	3,03
Сжиженный природный газ		0,75	2,75
Метанол		0,375	1,375
Этанол		0,5217	1,913

В соответствии с концепцией EEDI цель ИМО заключается в том, чтобы на судах были установлены двигатели и оборудование, которые были бы менее загрязняющими окружающей среды. EEDI - это мера количества CO₂, выбрасываемого судном на милло пропускной способности (тонно-миля).

EEDI (г. CO₂/т-миля) можем определить по следующей зависимости:

$$EEDI = \frac{N_e \cdot V_e \cdot C_{Fuel}}{DWT \cdot U} \quad (3)$$

где N_e – мощность главного двигателя на эксплуатационном режиме, кВт; V_e – удельный расход топлива главного двигателя, г/кВт.ч; DWT – дедвейт судна, т и U – скорость судна на эксплуатационном режиме, узлы.

Справочный уровень EEDI (EEDI базовой уровень) для каждого типа судна определяется как кривая. Его кривая описана на рис.3. Справочный EEDI определяется по следующей зависимости:

$$Справочный EEDI = a \cdot b^{-c} \quad (4)$$

где a, b и c являются постоянными, определенными из табл. 3.

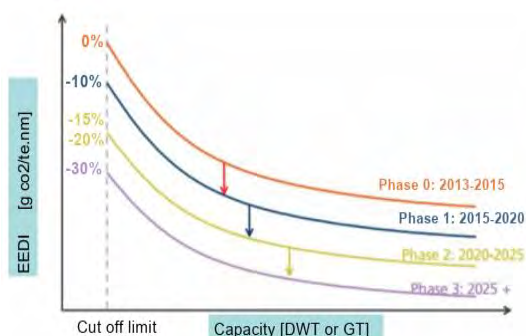


Рис. 3. Концепция требуемого EEDI, коэффициента снижения, предельные значения и EEDI этапы[7]

Таблица 3
Параметры для определения значения справочной EEDI

Тип судна, определенный в правиле 2	a	b	c
Балкер	961.79	DWT	0.477
Газовоз	1120	DWT	0.456
Танкер	1218.8	DWT	0.488
Контейнеровоз	174.22	DWT	0.201
Сухогруз	107.48	DWT	0.216
Рефрижератор	227.01	DWT	0.244
Нефтерудовоз	1219	DWT	0.488
Ролкер	(DWT) ^{-0.7} x 780.36, где DWT < 0.3	DWT	0.471
	1812.63, где DWT ≥ 0.3	DWT	
Ro-Ro (грузовоз)	1405.15	DWT	0.498

Ro-Ro (пассажирное)	752.16	DWT	0.381
LNG	2253.7	DWT	0.474
Круизное судно с нетрадиционной ПУ	170.84	DWT	0.214

Коэффициент снижения EEDI (X) представляет процент снижения EEDI относительно базового уровня EEDI. Значение «коэффициент снижения» определяется Международной морской организацией (ИМО). Его определенное значение указано в табл.4.

Таблица 4
Коэффициенты снижения EEDI, предельные значения и этапы внедрения

Тип судна	Контейнеровоз
Габариты	15000 DWT и более
	10000-15000 DWT
Этпа 0 1 янв 2013-31 дек 2014	0
Этпа 1 1 янв 2015-31 дек 2019	10
	0-10*
Этпа 2 1 янв 2020-31 дек 2024	20
	0-20*
Этпа 3 1 янв 2025 и далее	30
	0-30*

*Коэффициент снижения линейно интерполируется между двумя значениями в зависимости от размера судна.

Требуемый EEDI определяется на основе коэффициента уменьшения X для судна, который зависит от года постройки судна (Табл. 4) и значения контрольного EEDI в формуле (4). Связь между этими параметрами будет определять требуемое значение EEDI по формуле (5):

$$Требуемый EEDI = 1 - \left(\frac{X}{100} \right) \cdot (Справочный EEDI) \quad (5)$$

Полученный EEDI должен быть меньше требуемого EEDI.

2. Расчет EEDI_{weather}

EEDI_{weather} - это EEDI, достигнутый в Баллы Бофорта 6 встречных ветров и волн [2,6]. Когда судно управляется в репрезентативных морских условиях, его сопротивление оценивает высоко, выше, чем следует на спокойной воде. По требованию ИМО

сопротивление $EEDI_{weather}$ рассчитывается следующим путём:

$$R_T = R_{ship,t} + R_{shipAW,wind} + \Delta R_{shipAW,wave} \quad (7)$$

Где $R_{ship,t}$ – сопротивление судна на спокойной воде, $R_{AW,wind}$ – дополнительное сопротивление ветра, $R_{AW,wave}$ – дополнительное сопротивление волн.

Целью данной статьи является оценка $EEDI_{weather}$ за счет использования крыльев. Нам нужно знать необходимую мощность для перемещения судна с крылом и без него. Во-первых, нам нужно найти необходимое общее сопротивление.

Общее сопротивление R_T

$$R_{T,nofoil} = R_{ship,t} + R_{ship,AW} \quad (8)$$

$$R_{T,withfoil} = R_{ship,t} + R_{ship,AW} + R_{foil,wave} + R_{foil,viscous} - \langle R_t \rangle \quad (9)$$

Где $R_{foil,viscous}$ – вязкое сопротивление крыла, $R_{foil,wave}$ – волновое сопротивление крыла.

Для определения средней за период силы тяги нужно умножить коэффициент тяги на скоростной напор и площадь крыла, т.е

$$\langle R_t \rangle = \langle C_t \rangle \frac{\rho U^2}{2} S_{wing} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \langle C_t \rangle = & \frac{\pi h_o^2 k_a^2}{4} [a^{\dot{h}^2} + k_a^2 a^{\ddot{h}^2}] + \frac{\pi \alpha_o^2}{4} [a^{\alpha^2} + k_a^2 a^{\dot{\alpha}^2}] \\ & + \frac{\pi W_o^2}{4} [a^{W^2} + k_a^2 a^{\dot{W}^2}] \\ & - \frac{\alpha_o h_o}{2} [k_a \sin(\varphi_\alpha - \varphi_h) \cdot \{ \pi (a^{\dot{h}} a^\alpha + k_a^2 a^{\ddot{h}} a^{\dot{\alpha}}) - C_y^{\dot{h}} \}] + \\ & \frac{\alpha_o h_o}{2} [k_a^2 \cos(\varphi_\alpha - \varphi_h) \cdot \{ \pi (a^{\dot{h}} a^{\dot{\alpha}} + a^{\ddot{h}} a^\alpha) + C_y^{\dot{h}} \}] \quad (11) \\ & - \frac{\alpha_o^2}{2} C_y^\alpha - \frac{k_a}{2} h_o W_o \pi \sin(kx_f - \varphi_h) \cdot [a^{\dot{h}} a^W + k_a^2 a^{\ddot{h}} a^{\dot{W}}] \\ & + \frac{k_a^2}{2} h_o W_o \pi \cos(kx_f - \varphi_h) \cdot [a^{\dot{h}} a^{\dot{W}} - a^{\ddot{h}} a^W] \\ & + \frac{\alpha_o W_o}{2} [k_a \sin(kx_f - \varphi_\alpha) \cdot \{ \pi (a^\alpha a^{\dot{W}} - a^{\dot{\alpha}} a^W) - C_y^{\dot{W}} \}] \\ & + \frac{\alpha_o W_o}{2} [\cos(kx_f - \varphi_\alpha) \cdot \{ \pi (a^\alpha a^W + k_a^2 a^{\dot{\alpha}} a^{\dot{W}}) - C_y^W \}] \end{aligned}$$

где h_o – амплитуда вертикальной качки; α_o – амплитуда килевой качки, W_o – амплитуда гармонического порыва.

Требуемая мощность для перемещения судна от двигателя выражается уравнением [5]

$$N_e^{треб} = \left(\frac{R_T \cdot 0.514U}{\eta_{вал} \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{пр}} k_z + N_{нав} - N_{ум} \right) / Z_E \quad (12)$$

где $N_e^{треб}$ – мощность на фланце,

R_T – Общее сопротивление, U – скорость судна(уз),

$\eta_{вал}$ – КПД волопровода, $\eta_{пер}$ – КПД передача, $\eta_{пр}$ –

пропульсивный коэффициент, k_z – коэффициент запаса мощности, $N_{нав}$ – мощность навешенных механизмов неучитываемых механическим КПД двигателя, кВт, $N_{ум}$ – мощность утилизационных турбин, работающих на винте, кВт, Z_E – число движителей.

Литературные источники математического моделирования судов, движимых полностью или частично за счет использования энергии волн, развились в СПбГМТУ под руководством д.т.н., профессора К.В. Рождественского при участии аспиранта Зин Мин Хтета[9,10,11,12]. Источники [9,10], посвященные в основном вопросам движения судна исключительно за счет возобновляемой волновой энергии океана демонстрируют зависимость скорости движения судна и тяги энергосберегающих крыльев от длины волн. Источники [11,12], посвященны в основном вопросам уменьшения продольной качки и дополнительного сопротивления судна с энергосберегающими крыльевыми элементами.

Алгоритм для расчетов общего сопротивления, требуемой мощности и f_w показан на Рис 4. f_w – это безразмерный коэффициент, указывающий уменьшение скорости в репрезентативных морских условиях, таких как высота волны, частота волны и скорость ветра. f_w получается путем построения кривой мощности для судна в репрезентативных условия моря U_w , кривая мощности для судна в спокойной воде U_{ref} , и найти разницу в скорости судна между двумя кривыми при мощности, необходимой для того, чтобы судно могло ориентироваться по скорости в спокойной воде, показано на рис 5[3]. Безразмерный коэффициент

$$f_w = \frac{U_w}{U_{ref}} \quad (13)$$

Стандартная кривая f_w была получена на основе данных о фактическом снижении скорости существующих судов в репрезентативных морских условиях в соответствии с процедурой получения стандартных кривых f_w . Стандартное значение

$$f_w = a \times \ln(DWT) + b \quad (14)$$

где a и b - параметры, приведенные в таблице 5.

Таблица 5
 Параметры для определения стандартного значения f_w

Тип судна	a	b
Балкер	0,0429	0,294
Танкер	0,0238	0,526
Контейнеровоз	0,0208	0,633

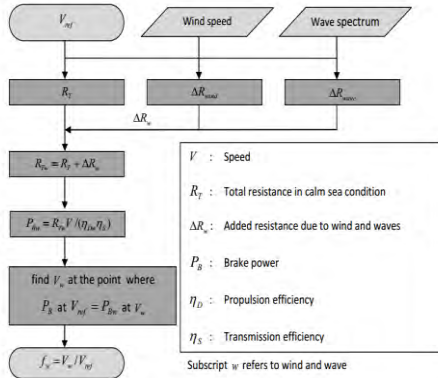


Рис 4. Алгоритм для расчетов общего сопротивления, требуемую мощность и f_w [3]

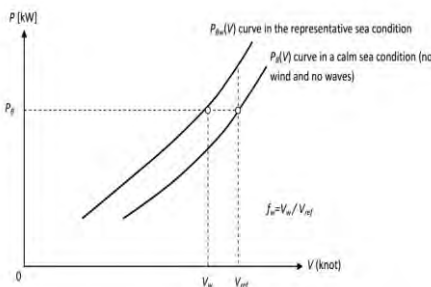


Рис 5. Связь между мощностью и снижением скорости судна [3]

3. Теория дополнительного сопротивления Герритсмы и Бекельмана

Практический метод расчета дополнительного сопротивления предложен Герритсмой и Бекельманом. Метод основан на определении энергии волн, создаваемых судном при качке, и так как основную роль в волнообразовании играют ветрикальные колебания, учитывают только продольную качку. В соответствии с гипотезой плоских сечений, энергия, создаваемая качающимся судном за счет волнообразования в течении периода качки, $T = \frac{2\pi}{\omega_e}$, равно: [12]

$$E = \int_0^T \int_0^L b' \cdot U_z dx dt \quad (15)$$

Где $b' = b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx_f}$ коэффициент

демпфирования в сечении, b_{33} и a_{33} являются присоединенными массы и коэффициентами демпфирования нулевой скорости судна соответственно и U – скорость судна.

$$U_z = -U\dot{\eta}_5 - \dot{\eta}_3 + X_f \dot{\eta}_5 + i \left[\omega \zeta_a e^{kz} e^{i(\omega_e t - kx_f \cos(\beta))} \right] \quad (16)$$

U_z – вертикальная скорость сечения относительно воды.

В работе [13] определяется дополнительное сопротивление судна по правилам ИМО 2012 и по теории Герритсмы и Бекельмана. Полученные результаты из теории Герритсмы и Бекельмана почти удовлетворяли по требованиям ИМО. В данной работе используется теория Герритсмы и Бекельмана.

4. Анализ результатов

Расчет индекса EEDI (г. CO₂/т-мили) очень важен для оценки выбросов CO₂ (г /т-мили) с судна в море и энергоэффективность судна в море. EEDI, EEDI_{weather} и требуемый EEDI зависит от года постройки контейнеровоза и вычисляется с определенными параметрами деталей в таблице 6 и в таблице 7. Общее сопротивление и требуемая мощность, главные параметры для достижения EEDI и EEDI_{weather}, показаны на рис. 6 и рис. 7. При расчете EEDI_{weather}, общее сопротивление и требуемая мощность рассчитаны не только для простого судна, но и для судна с крыльевыми устройствами, движимого полностью или частично за счет использования энергии волнения. Поскольку грузоподъемность контейнеровоза является дедвейтом, грузоподъемность рассматриваемого судна определяется как 14827,8 (тон). Путем замены 14827,8 на уравнение (14) стандартное значение f_w получается равным 0,833. Полученный результат f_w контейнеровоза показан на рис. 8.

Характерные величины судна: L = 175м, B = 25,4 м, T = 9,5 м, размах крыла s = 15м, хорда c = 5 м, удлинение крыла Λ=3, размах крыла s = 20м, хорда c = 5 м, удлинение крыла Λ=4 и размах крыла s = 25м, хорда c = 5 м, удлинение крыла Λ=5.

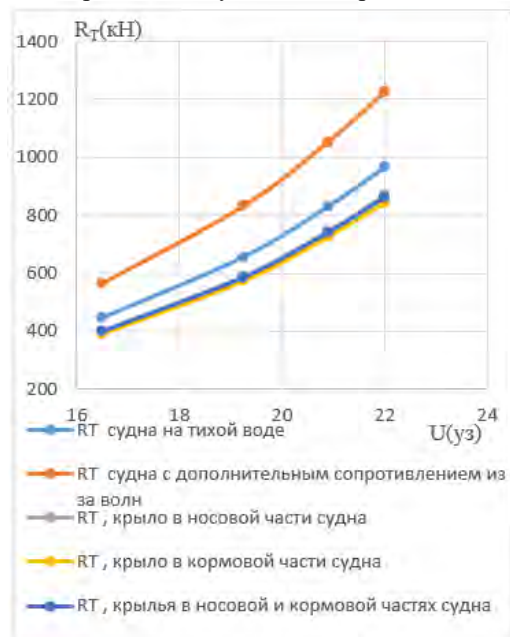


Рис 6. Общее сопротивление судна с дополнительным сопротивлением из за волн

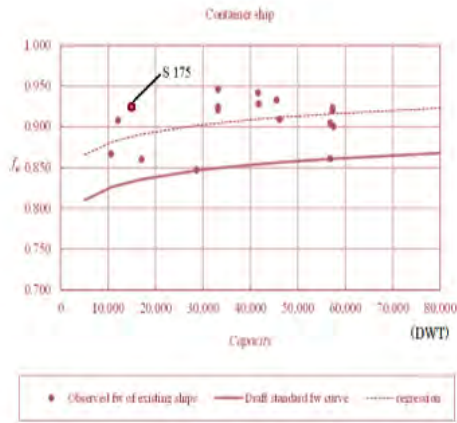


Рис 8. Стандартная кривая f_w для контейнеровоза и местоположение f_w для S-175

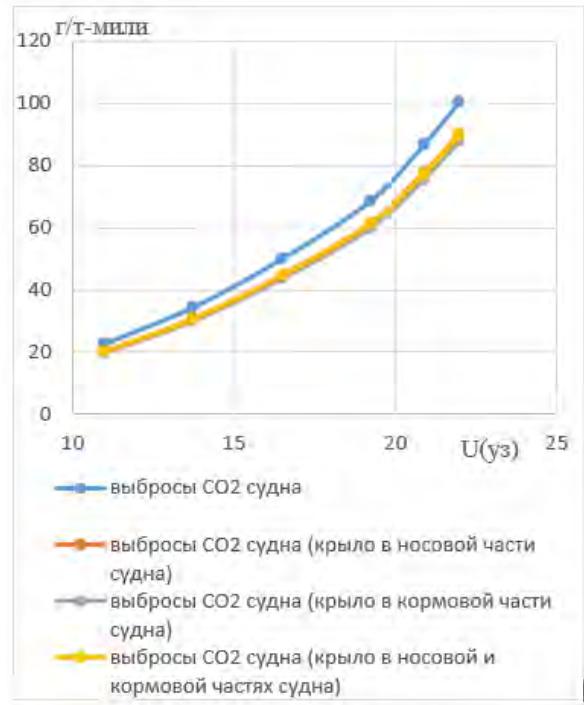


Рис 9. Выбросы CO_2 (г/т-миль)

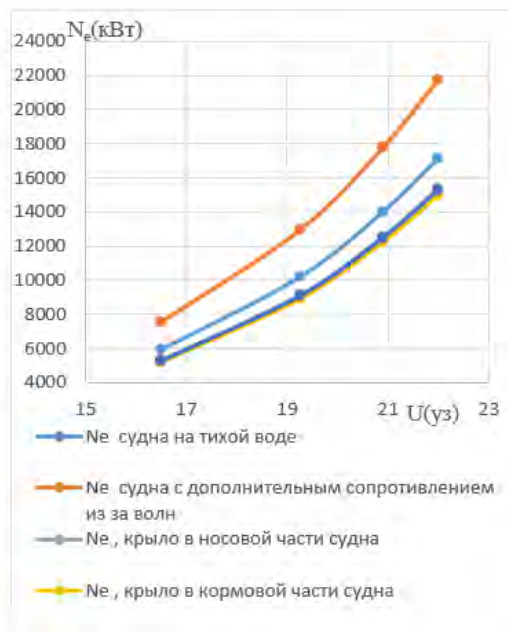


Рис 7. Требуемая мощность судна в репрезентативных морских условиях (Баллы Бофорта 6)

Таблица 6

Результаты индексы EEDI и требуемый EEDI судна

EEDI судна (г. CO_2 /т-миль)	Этап 1 1 янв 2015-31 дек 2019	Этап 2 1 янв 2020-31 дек 2024	Этап 3 1 янв 2025 и далее	U_w (уз)	f_w
27,31	22,75	20,22	17,69	22	0,93

Таблица 7

Результаты индексы $EEDI_{weather}$ судна с крыльевыми устройствами

$EEDI_{weather}$ (г. CO_2 /т-миль)	местоположение крыло или крылья								
	В носу $\Lambda=3$	В носу $\Lambda=4$	В носу $\Lambda=5$	В корме $\Lambda=3$	В корме $\Lambda=4$	В корме $\Lambda=5$	В носу+корме $\Lambda=3$	В носу+корме $\Lambda=4$	В носу+корме $\Lambda=5$
28,99	25,86	24,49	23,47	24,59	23,25	21,93	25,69	24,55	24,47

Выводы

Необходим расчет достигнутого EEDI и требуемого EEDI для оценки и наибольшей эффективности работы. С одной стороны, он определяет не только массу выбросов CO₂ в окружающую среду, но и управление энергоэффективностью на судах.

В статье предложены EEDI, EEDI_{weather}, выбросов CO₂ по требованию ИМО. При расчете EEDI_{weather} рассматривается не только для простого судна, но и для судна с крыльевыми устройствами, движимого полностью или частично за счет использования энергии волнения.

Из анализа полученных расчетных данных следует:

1. Применение поправочных коэффициентов в руководящих принципах ИМО для судна снижает EEDI на 12%, с 27,31 до 22,75 на первом этапе, на

Автор выражает признательность профессору К.В. Рождественскому и аспиранту Хтет Паинг Аунгу за участие в обсуждении этой работы.

25% с 27,31 до 20,22 на втором этапе и на 35% с 27,31 по 22,75 на третьем этапе.

2. EEDI_{weather} на 6,15% выше, чем EEDI на спокойной воде.
3. Судно с крыльевыми устройствами может уменьшить дополнительное сопротивление на встречном волнении до 40% по баллам Бофорта 6.
4. Получение значения f_w находится вблизи линии регрессии, что показывает, что результат f_w находится в хорошем состоянии.
5. 13% выбросов CO₂ может уменьшиться при использовании удлинении крыла $\Lambda=3$.

Настоящая статья полезна для расчета выбросов CO₂, EEDI и EEDI_{weather} для нового судна с крыльевыми устройствами в соответствии с рекомендациями ИМО.

Литература

1. International Maritime Organization, 2011. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto. Resolution MEPC.203(62).
2. International Maritime Organization, 2014a. 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.245(66).
3. International Maritime Organization, 2012. Interim guidelines for the calculation of the coefficient f_w for decrease in ship speed in a representative sea condition for trial use. MEPC.1/Circ.796.
4. International Maritime Organization. Third IMO GHG Study 2014. 327 P.
5. Хтет Паинг Аунг. Автоматизированное проектирование и оптимизация пропульсивных комплексов со среднеоборотными двигателями: дис.; специальность: 05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) / Хтет Паинг Аунг. – СПбГМТУ.: ФКЭИА, 2019. – 182с.
6. International Maritime Organization, 2018. 2018 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.308(73).
7. Tien Anh Tran. Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier/ Journal of Marine Science: Research & Development, 6(6), 2016, DOI: 10.4172/2155-9910.1000212.
8. International Maritime Organization, 2013. 2013 guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI). Resolution MEPC. 231(65).
9. Зин Мин Хтет., Рождественский К. В. Математическое моделирование судна, движимого энергией волн. Морские интеллектуальные технологии, № 1(43), стр.32-38. 2019.
10. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical modeling of marine robots with energy-saving wing devices. International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration. MarineRobotics 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia.
11. Рождественский К.В., Зин Мин Хтет. Будущее зелёного судоходства с использованием энергии волн. Всероссийская конференция. Рождественские встречи: современные проблемы гидродинамики. Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2019.
12. Зин Мин Хтет., Рождественский К.В. К вопросу о снижении дополнительного сопротивления судна с энергосберегающими крыльевыми элементами. Всероссийская конференция. Рождественские встречи: современные проблемы гидродинамики. Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2019.
13. Eirik Bøckmann., Sverre Steen. Calculation of EEDI_{weather} for a general cargo vessel. Ocean Engineering 122 (2016). Pp 68–73.

Reference

1. International Maritime Organization, 2011. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto. Resolution MEPC.203(62).
2. International Maritime Organization, 2014a. 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.245(66).
3. International Maritime Organization, 2012. Interim guidelines for the calculation of the coefficient f_w for decrease in ship speed in a representative sea condition for trial use. MEPC.1/Circ.796.
4. International Maritime Organization. Third IMO GHG Study 2014. 327 P.
5. Htet Paing Aung. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i optimizatsiya propul'sivnykh kompleksov so sredneoborotnymi dvigatelyami [Computer-aided design and optimization of propulsion systems with medium-speed engines]: dis.; spetsial'nost': 05.08.05 – Sudovyye energeticheskiye ustanovki i ikh elementy (glavnyye i vspomogatel'nyye) / Htet Paing Aung. – SPbGMTU.: FKEiA, 2019. – 182p.

6. International Maritime Organization, 2018. 2018 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. Resolution MEPC.308(73).
7. Tien Anh Tran. Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier/ Jorunal of Marine Science: Research & Development, 6(6), 2016, DOI: 10.4172/2155-9910.1000212.
8. International Maritime Organization, 2013. 2013 guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI). Resolution MEPC. 231(65).
9. Zin Min Htet., Rozhdestvensky K. V. Matematicheskoye modelirovaniye sudna, dvizhimogo energiyey voln [Mathematical modeling of a ship, propelled by wave power]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, № 1(43), str.32-38. 2019.
10. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical modeling of marine robots with energy-saving wing devices. International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration. MarineRobotics 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia.
11. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Budushcheye zelonogo sudokhodstva s ispol'zovaniyem energii voln [The future of green shipping with use of wave energy]. Vserossiyskaya konferentsiya. Rozhdestvenskiye vstrechi: sovremennyye problemy gidrodinamiki. Sankt-Peterburg, SPbGMTU, 2019.
12. Zin Min Htet., Rozhdestvensky K.V. K voprosu o snizhenii dopolnitelnogo soprotivleniya sudna s energosberegayushchimi kryl'yevymi elementami [To the matter of reducing wave-added resistance of a ship with energy-saving wing elements]. Vserossiyskaya konferentsiya. Rozhdestvenskiye vstrechi: sovremennyye problemy gidrodinamiki. Sankt-Peterburg, SPbGMTU, 2019.
13. Eirik Bøckmann., Sverre Steen. Calculation of EEDIweather for a general cargo vessel. Ocean Engineering 122 (2016). Pp 68–73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зин Мин Хтет, аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: zinmin.353828@gmail.com

Zin Min Htet, graduate student, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, Saint-Petersburg State marine technical university Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: zinmin.353828@gmail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.046
УДК 629.5.017.2/.015.24

Исследования особенностей снижения продольной качки и дополнительного сопротивления судна с крыльевыми устройствами

Зин Мин Хтет¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В данной статье на основе предложенного расчета качки судна с энергосберегающими крыльевыми устройствами производится оценка мореходности и ходкости такого судна и возможности целенаправленного уменьшения амплитуд качки и снижения дополнительного сопротивления на волнении. Продольная качка судна заданного типа, обводов и размерений при наличии крыльевых элементов на заданном регулярном волнении рассчитывается с привлечением совместных уравнений вертикально-килевой качки с учетом демпфирования и инерции крыльевых устройств. При этом используется теория Теодорсена колеблющегося профиля и разложение нестационарных коэффициентов подъемной силы и момента по кинематическим параметрам при комбинировании вертикальных и угловых колебаний, и, в общем случае, в условиях воздействия орбитального движения жидкости. Для оценки дополнительного сопротивления используется теория Герритсмы и Бекельмана. В ходе расчетов демонстрируется влияние на дополнительное сопротивление удлинения и площади энергосберегающих крыльев, а также возможности снижения дополнительного сопротивления при совместном использовании носового и кормового крыльев по сравнению со случаем использования только одного (носового или кормового) крыла. Полученные расчетные данные позволяют получить представление о механизме влияния энергосберегающих крыльев на умерение амплитуд качки и снижение дополнительного сопротивления на волнении.

Ключевые слова: системы крыльев для снижения дополнительного сопротивления, движители типа «машущее крыло», продольная качка судна.

Study of peculiarities of reducing longitudinal motions and added resistance for a ship with wing devices

Zin Min Htet¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. In this article on the basis of the method for calculation of longitudinal motions of a ship with energy-saving wing devices proposed there is made an estimation of seaworthiness and seagoing capacity of such a ship and also of a possibility of directed decrease of ship motions amplitudes and added resistance in waves. The longitudinal motions of a ship of a given type, configuration and dimensions, in presence of wing elements, and in given regular waves is calculated with use of coupled equations of heave and pitch motions with account of damping and inertia of wing devices. Used therewith is Theodorsen theory of oscillating foil and expansion of lift and moment coefficients with respect to kinematic parameters for combined heave-and-pitch oscillations and, in general case, subject to action of orbital motion of fluid particles. To estimate added resistance the Beukelman-Gerritsma theory is used. Demonstrated in the course of calculations is the influence of aspect ratio and area of energy-saving wing upon the added resistance as well as upon its decrease when combining use of both bow and stern wings as compared to the case of using just one (bow or stern) wing. Obtained calculated data allow to understand the mechanism of the influence of energy-saving wings upon decrease of the amplitude of ship motions and the added resistance in waves.

Key words: wing systems for reducing added resistance, "flapping-wing" propulsors, longitudinal ship motion.

Введение

При движении на волнении сопротивление судна может увеличиваться на 15-30%. Оценка дополнительного сопротивления на волнении представляет собой одну из важных задач проектирования судов с точки зрения выбора двигателей, расхода топлива и оценки времени прохождения маршрута, [1]. На Рис. 1, заимствованном из работы [2], приведена зависимость дополнительного волнового сопротивления от времени. Постоянная часть соответствует сопротивлению на тихой воде, а периодическая - связана с движением судна относительно набегающих регулярных волн. Усредненная по времени часть увеличения сопротивления называется дополнительным волновым сопротивлением, $R_{ав}$.

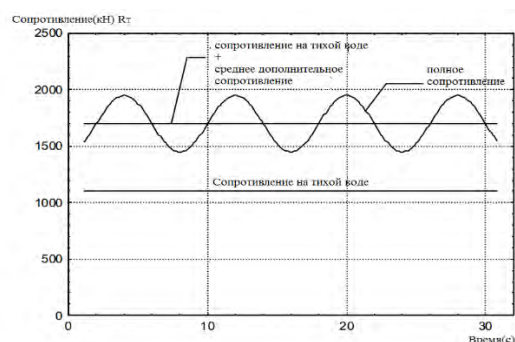


Рис 1. Дополнительное сопротивление в волнах при разнице между сопротивлением на тихой воде и общим сопротивлением [2]

Как утверждает Фалтинсен [3], сопротивление, обусловленное носовой волной, при малых длинах волн преобладает. При больших длинах волн доминирует дополнительное волновое

сопротивление, вызванное продольной качкой судна. Последнее, как видно из Рис. 2, достигает максимума при длине волны, близкой к длине судна $\lambda/L \approx 1$. На Рис. 2 коротким волнам соответствует $\lambda/L \leq 0,5$, а длинным - $\lambda/L > 0,5$.

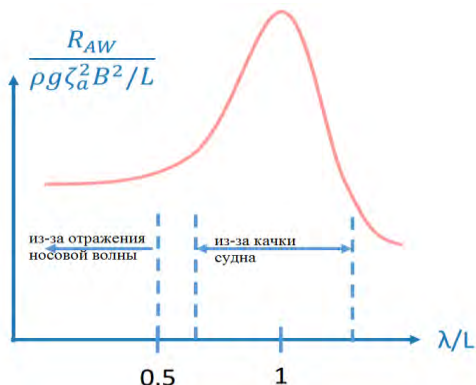


Рис 2. Характерная зависимость дополнительного сопротивления судна от относительной длины волны на регулярном встречном волнении и при умеренных числах Фруда [3]

Насколько известно авторам, использование крыловых устройств для уменьшения продольной качки и дополнительного сопротивления впервые было предложено Джоном Спенсером Ависом [4]. Он нашел способ уменьшения продольной качки и дополнительного сопротивления яхты с помощью носового крыла и испытал этот эффект на практике на регулярном встречном волнении.

Холодилин А.Н [5] исследовал носовые и кормовые крылья для успокоения продольной качки судов, но не приводит данных по дополнительному сопротивлению судна с крыльевыми устройствами. Лузянин А.А [6] провел исследование продольной качки и дополнительного сопротивления морских составных судов с шарнирным сцепом.

В работах [8,11] предложена математическая модель судна с носовыми и/или кормовыми крыльями, генерирующими дополнительную тягу за счет вертикальной и килевой качки, Рис. 3. Модель представляет собой синтез уравнений качки судна (с учетом гидродинамических сил на крыльях) с теорией машущего крыла и на ее основе можно получить предварительные оценки возможности уменьшения амплитуд качки и снижения дополнительного сопротивления на волнении.

В данной работе приведены основные результаты расчетов с использованием указанной математической модели, откуда с привлечением теории Герритсм-Бекельмана определяется дополнительное волновое сопротивление судна с энергосберегающими крыльями.

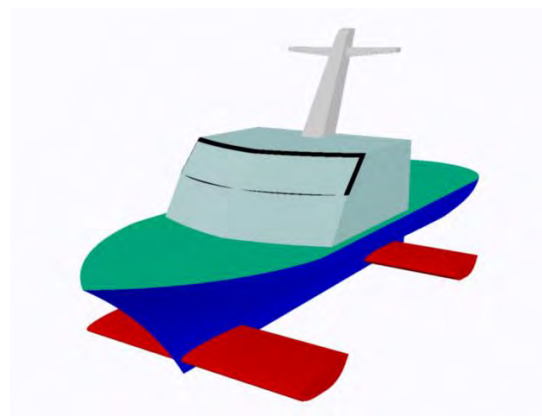


Рис 3. Энергосберегающее судно с крыльевыми устройствами

1. К расчёту продольной качки судна

Используется метод поперечных сечений в частотной области. Связанные уравнения продольной качки судна, составляющими которой являются вертикальная и килевая качки, могут быть записаны в виде, [3]

$$(M + A_{33}) \ddot{\eta}_3 + B_{33} \dot{\eta}_3 + C_{33} \eta_3 + A_{35} \ddot{\eta}_5 + B_{35} \dot{\eta}_5 + C_{35} \eta_5 = F_3 e^{i\omega t} \tag{1}$$

$$A_{53} \ddot{\eta}_3 + B_{53} \dot{\eta}_3 + C_{53} \eta_3 + (I_5 + A_{55}) \ddot{\eta}_5 + B_{55} \dot{\eta}_5 + C_{55} \eta_5 = F_5 e^{i\omega t} \tag{2}$$

где A_{ik} - присоединенные массы, B_{ik} - коэффициенты сопротивления; C_{ik} - коэффициенты восстанавливающих сил; i - индекс, обозначающий тот вид качки, для которого подсчитывается сила сопротивления, или мнимая единица; k - вид поступательного или вращательного движения, η_1 - продольно-горизонтальная качка, η_2 - поперечно-горизонтальная качка, η_3 - вертикальная качка, η_4 - бортовая качка, η_5 - килевая качка, η_6 - рысканье.

2. Скачок коэффициента давления на тонком профиле при нестационарном обтекании

Комплексная амплитуда скачка коэффициента давления в общем случае нестационарного обтекания найдена в [7, 12]

$$\begin{aligned} [\hat{P}] &= 2\hat{a} \sqrt{\frac{1-x}{1+x}} + 4ik_a C \sqrt{1-x^2} - \\ &4ik_a C_1 \left(\arcsin x - \frac{\pi}{2} \right) + [\hat{P}_1] + ik_a \int_1^x [\hat{P}_1] d\xi; \end{aligned} \tag{3}$$

где

$$[\hat{P}_1] = -\frac{4}{\pi} \sqrt{1-x^2} \int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi}{\sqrt{1-\xi^2}(\xi-x)} d\xi \quad (4)$$

Отметим, что интеграл в формуле(4) вычисляется в смысле главного значения по Коши. Входящие в уравнение(3) параметры \hat{a}, c и \hat{B} даются формулами

$$\hat{a} = -\frac{2}{\pi}(\hat{A}\hat{C} + \hat{B}), \quad c = -\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi \quad (5)$$

$$\hat{A} = \int_{-1}^1 \hat{F}_\varphi \sqrt{\frac{1+\xi}{1-\xi}} d\xi, \quad \hat{B} = -\int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi \quad (6)$$

Где $\hat{C}(k_a) = F(k_a) + iG(k_a)$ есть функция Теодорсена, которая выражается через функции Ганкеля второго рода первого и нулевого порядка

$$\hat{C}(k_a) = \frac{H_1^{(2)}(k_a)}{H_1^{(2)}(k_a) + iH_0^{(2)}(k_a)} \quad (7)$$

а \hat{F}_φ представляет собой комплексную амплитуду нестационарного скоса на профиле $F_\varphi(x,t) = \frac{\partial y_c}{\partial x} + \frac{\partial y_c}{\partial t} = \hat{F}_\varphi(x,t)e^{ik_a t}$ в котором $y_c(x,t)$ есть уравнение средней линии, а $k_a = \omega_e c / 2U$ есть число Струхала составленное по круговой частоте неа стационарного возмущения, c – хорда крыла, U – скорость движения профиля, $i = \sqrt{-1}$.

2.1. Определение гидродинамических коэффициентов

Имея в своем распоряжении скачок давления на профиле, можно вычислить интересующие нас гидродинамические коэффициенты подъемной силы c_y и продольного момента m_z . В случае гармонической зависимости от времени c_y и m_z могут быть записаны в виде[7,12]

$$c_y = \hat{c}_y e^{ik_a t}; \quad m_z = \hat{m}_z e^{ik_a t} \quad (8)$$

причем комплексные амплитуды этих коэффициентов могут быть найдены по формулам

$$\hat{c}_y = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [\hat{P}] d\xi; \quad \hat{m}_z = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [\hat{P}](\xi - a_o) d\xi \quad (9)$$

где a_o – абсцисса точки, относительно которой вычисляется момент. Принимая в внимание соотношение (9), приходим к следующим выражениям:

$$\hat{c}_y = -2(\hat{A}\hat{C} + ik_a \hat{E}); \quad \hat{E} = \hat{F}_\varphi(\xi) \sqrt{1-\xi^2} d\xi \quad (10)$$

2.2. Вертикальные колебания

При чисто вертикальных колебаниях имеем $h(t) = h_o \cos(k_a t) = h_o e^{ik_a t}$. Тогда $F_\varphi(x,t) = ih_o k_a e^{ik_a t}, \hat{F}_\varphi = ih_o k_a$ и применяя приведенные выше формулы, получим

$$\begin{aligned} a^{\dot{h}} &= -2F(k_a), \quad a^{\ddot{h}} = \frac{-2G(k_a)}{k_a}, \\ c_y^{\dot{h}} &= -2\pi F(k_a), \quad c_y^{\ddot{h}} = \frac{-2\pi}{k_a} \left[G(k_a) + \frac{k_a}{2} \right], \\ m_z^{\dot{h}} &= \pi F(k_a), \quad m_z^{\ddot{h}} = \frac{\pi G(k_a)}{k_a}, \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 Угловые колебания

При чисто угловых колебаниях относительно оси с абсциссой a_o имеем $h(t) = h_o \cos(k_a t) = h_o e^{ik_a t}$ и получим

$$\begin{aligned} a^\alpha &= 2 \left[F + k_a(a_o - 1/2)G \right], \\ a^{\dot{\alpha}} &= 2 \left[\frac{G}{k_a} - F(a_o - 1/2) - \frac{1}{2} \right], \\ c_y^\alpha &= 2\pi \left[F + k_a G(a_o - 1/2) + \frac{k_a^2 a_o}{2} \right], \\ c_y^{\dot{\alpha}} &= 2\pi \left[\frac{G}{k_a} - F(a_o - 1/2) + \frac{1}{2} \right], \\ m_z^\alpha &= -\pi \left[F + k_a G(a_o - 1/2) + \frac{k_a^2}{8} \right], \\ m_z^{\dot{\alpha}} &= -\pi \left[\frac{G}{\omega_e} - F(a_o - 1/2) - \frac{1}{2} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

2.4 Гармонический порыв

При воздействии гармонического вертикального порыва $W(x,t) = W_o \cos(\omega_e t - kx_f)$,

$$F_\varphi(x,t) = W_o e^{i(\omega_e t - kx_f)}, \quad W_o = \frac{\zeta_a k}{2k_a Fr_c^2} e^{-kz_f} \quad \text{и}$$

получим

$$\begin{aligned} a^W &= \frac{2}{k_a} [J_0 G - J_1 F - J_1], \\ a^{\dot{W}} &= 2 [J_0 F + J_1 G], \quad c_y^W = 2\pi [J_0 F + J_1 G], \\ c_y^{\dot{W}} &= \frac{2\pi}{k_a} [J_0 G - J_1 F + k_a J_0 - J_2], \\ m_z^W &= \pi \left[J_0 F + J_1 G + J_2 - \frac{1}{4} k_a J_0 - J_3 \right], \\ m_z^{\dot{W}} &= \frac{\pi}{k_a} [J_0 G + J_1 F + J_1], \end{aligned} \quad (13)$$

Где $F(k_a), G(k_a)$ – функция Теодорсена,
 J_0, J_1, J_2 функция Бесселя

3. Определение гидродинамических коэффициентов системы крыльев

В линейном приближении коэффициенты подъемной силы и момента могут быть записаны в виде разложения по выбранным кинематическим параметрам возбуждения $\{h, \alpha, W\}$ [9]

$$c_y = c_y^{\dot{h}} \dot{h} + c_y^{\ddot{h}} \ddot{h} + c_y^{\alpha} \alpha + c_y^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + c_y^W W + c_y^{\dot{W}} \dot{W} \quad (14)$$

$$m_z = m_z^{\dot{h}} \dot{h} + m_z^{\ddot{h}} \ddot{h} + m_z^{\alpha} \alpha + m_z^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + m_z^W W + m_z^{\dot{W}} \dot{W} \quad (15)$$

где W – кинематический параметр, обусловленный набегающей на крыло волной

Выбрав в качестве обобщенных координат: вертикальное перемещение центра тяжести судна η_3 , угол дифферента судна η_5 и угол наворота крыла α , абсолютные вертикальные и угловые перемещения точки крыла

$$h = \eta_3 + x_f \eta_5 \quad (16)$$

где x_f – расстояние от центра тяжести судна до оси вращения крыла тогда уравнение, описывающее мгновенное положение крыла, запишется в виде

$$f_U(x, z, t) = \eta_3 + x_f \eta_5 + \alpha \quad (17)$$

Подставим в разложения для коэффициентов подъемной силы и продольного момента крыла (14, 15) выражения для кинематических параметров (16) и их производных, определяемых формулами

$$\dot{h} = \dot{\eta}_3 + x_f \dot{\eta}_5, \quad \ddot{h} = \ddot{\eta}_3 + x_f \ddot{\eta}_5, \quad (18)$$

$$c_y = c_y^{\dot{h}} \frac{1}{U} (\dot{\eta}_3 + x_f \dot{\eta}_5) + c_y^{\ddot{h}} \frac{c}{U^2} (\ddot{\eta}_3 + x_f \ddot{\eta}_5) + \quad (19)$$

$$c_y^{\dot{\alpha}} \frac{\zeta_a}{U} \dot{\theta} + c_y^{\ddot{\alpha}} \frac{\zeta_a}{U} \ddot{\theta} + c_y^W \frac{1}{U} W_0 + c_y^{\dot{W}} \frac{c}{U^2} \dot{W}_0$$

$$m_z = c_y x_f \quad (20)$$

Группируя в формулах (19), (20) коэффициенты, стоящие перед их производными, добавляя их к

соответствующим коэффициентам уравнений (1), (2), приходим к окончательному виду системы дифференциальных уравнений, описывающих динамическую систему "крылья-качающееся судно"

$$(M + A'_{33}) \ddot{\eta}_3 + B'_{33} \dot{\eta}_3 + C'_{33} \eta_3 + A'_{35} \ddot{\eta}_5 + B'_{35} \dot{\eta}_5 + C'_{35} \eta_5 = F_3 e^{i\omega_e t} \quad (21)$$

$$A'_{53} \ddot{\eta}_3 + B'_{53} \dot{\eta}_3 + C'_{53} \eta_3 + (I_5 + A'_{55}) \ddot{\eta}_5 + B'_{55} \dot{\eta}_5 + C'_{55} \eta_5 = F_5 e^{i\omega_e t} \quad (22)$$

Здесь в выражениях (21), (22) присутствуют только вещественные части коэффициентов, которые определяются соотношениями

Крыло на носовой части судна ($-X_f$)

$$A'_{33} = A_{33} + c_y^{\ddot{h}} \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 s, \quad B'_{33} = B_{33} - c_y^{\dot{h}} \rho \frac{U}{1 + \frac{U}{\Lambda}} cs, \quad C'_{33} = C_{33},$$

$$A'_{35} = A_{35} - c_y^{\ddot{h}} \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f \times s,$$

$$B'_{35} = B_{35} - c_y^{\dot{h}} \rho \frac{U}{1 + \frac{U}{\Lambda}} x_f cs + c_y^{\dot{\alpha}} \rho U \left(\frac{c}{2}\right)^2 s,$$

$$C'_{35} = C_{35} + c_y^{\alpha} \rho \frac{U^2}{1 + \frac{U}{\Lambda}} cs,$$

$$A'_{53} = A_{53} - c_y^{\ddot{h}} \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f \times s,$$

$$B'_{53} = B_{53} - c_y^{\dot{h}} \rho \frac{U}{1 + \frac{U}{\Lambda}} x_f cs, \quad C'_{53} = C_{53}, \quad (23)$$

$$A'_{55} = A_{55} + c_y^{\ddot{h}} \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f^2 \times s,$$

$$B'_{55} = B_{55} + c_y^{\dot{h}} \rho \frac{U}{1 + \frac{U}{\Lambda}} x_f^2 cs - c_y^{\dot{\alpha}} \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 U x_f s,$$

$$C'_{55} = C_{55} - c_y^{\alpha} \rho \frac{U^2}{1 + \frac{U}{\Lambda}} x_f cs,$$

$$F_3^i = \left\langle F_3^{Real} + \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \cos(-kx_f) - \\ (\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \sin(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle +$$

$$\left\langle F_3^{Im} - \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \sin(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \cos(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle$$

$$F_5^i = \left\langle F_5^{Real} + \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \cos(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \sin(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle +$$

$$\left\langle F_5^{Im} - \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \sin(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \cos(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle$$

Крыло на кормовой части судна (x_f)

$$A'_{33} = A_{33} + c_y^h \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 s,$$

$$B'_{33} = B_{33} - c_y^h \rho \frac{U}{1 + \frac{2}{\Lambda}} cs, \quad C'_{33} = C_{33},$$

$$A'_{35} = A_{35} + c_y^h \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f \times s,$$

$$B'_{35} = B_{35} + c_y^h \rho \frac{U}{1 + \frac{2}{\Lambda}} x_f cs + c_y^a \rho U \left(\frac{c}{2}\right)^2 s,$$

$$C'_{35} = C_{35} + c_y^a \rho \frac{U^2}{1 + \frac{2}{\Lambda}} cs,$$

$$A'_{53} = A_{53} + c_y^h \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f \times s,$$

$$B'_{53} = B_{53} + c_y^h \rho \frac{U}{1 + \frac{2}{\Lambda}} x_f cs,$$

$$C'_{53} = C_{53}, \quad (24)$$

$$A'_{55} = A_{55} + c_y^h \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f^2 \times s,$$

$$B'_{55} = B_{55} + c_y^h \rho \frac{U}{1 + \frac{2}{\Lambda}} x_f^2 cs + c_y^a \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 U x_f s,$$

$$C'_{55} = C_{55} + c_y^a \rho \frac{U^2}{1 + \frac{2}{\Lambda}} x_f cs,$$

$$F_3^i = \left\langle F_3^{Real} + \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \cos(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \sin(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle +$$

$$\left\langle F_3^{Im} - \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \sin(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \cos(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle$$

$$F_5^i = \left\langle F_5^{Real} + \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \cos(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \sin(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle +$$

$$\left\langle F_5^{Im} - \begin{bmatrix} (\rho U c_s \frac{\omega_0 \zeta A e^{kz_f}}{1 + \frac{2}{\Lambda}} c_y^W \sin(-kx_f) \\ -(\rho \frac{\omega_0 \omega_e \zeta a e^{kz_f} c^2 s}{4} c_y^W \cos(-kx_f) \end{bmatrix} \right\rangle$$

Крылья на носовой и кормовой частях судна

$$A'_{33} = A_{33} + 2c_y^h \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 s,$$

$$B'_{33} = B_{33} - 2c_y^h \rho \frac{U}{1 + \frac{2}{\Lambda}} cs,$$

$$C'_{33} = C_{33}, \quad A'_{35} = A_{35},$$

$$B'_{35} = B_{35} + 2c_y^a \rho U \left(\frac{c}{2}\right)^2 s,$$

$$C'_{35} = C_{35} + c_y^a \rho \frac{U^2}{1 + \frac{2}{\Lambda}} cs$$

$$A'_{53} = A_{53}, \quad B'_{53} = B_{53}, \quad C'_{53} = C_{53}, \quad (25)$$

$$A'_{55} = A_{55} + 2c_y^h \rho \left(\frac{c}{2}\right)^2 x_f^2 \times s,$$

$$B'_{55} = B_{55} + 2c_y^h \rho \frac{U}{1 + \frac{2}{\Lambda}} x_f^2 cs,$$

$$C'_{55} = C_{55} + c_y^a \rho \frac{U^2}{1 + \frac{2}{\Lambda}} x_f cs,$$

$$F_3^i = [F_3^{Real} + F_{3, носовое-крыло}^{Real} + F_{3, кормовое-крыло}^{Real}] +$$

$$[F_3^{Im} - (F_{3, носовое-крыло}^{Im} + F_{3, кормовое-крыло}^{Im})]$$

$$F_5^i = [F_5^{Real} + F_{5, носовое-крыло}^{Real} + F_{5, кормовое-крыло}^{Real}] +$$

$$[F_5^{Im} - (F_{5, носовое-крыло}^{Im} + F_{5, кормовое-крыло}^{Im})]$$

где ζ_a – амплитуда волны, ω_o – угловая частота волны, ω_e – кажущаяся частота, k – волновое число, U – скорость судна, s – размах крыла, c – хорда, $\Lambda = \frac{c}{s}$, $\omega_o = \sqrt{gk}$, $k_a = \frac{\omega_e c}{2U}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega_o = \omega_e + kU \cos \beta$.

Перечет на конечное удлинение в данной работе осуществлялся по формулам теории несущей линии Прандтля.

4. Теория дополнительного сопротивления Герритсмй и Бекельмана

Практический метод расчета дополнительного сопротивления предложен Герритсмй и Бекельманом. Метод основан на определении энергии волн, создаваемых судном при качке. Так как основную роль в волнообразовании играют вертикальные колебания, учитывается только продольную качку. В соответствии с гипотезой плоских сечений, энергия, излучаемая качающимся судном за счет волнообразования в течении периода качки, $T = \frac{2\pi}{\omega_e}$, равна:[10]

$$E = \int_0^T \int_0^L b' U_z dx dt \tag{26}$$

Где $b' = b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx_f} =$ коэффициент демпфирования в сечении, b_{33} и a_{33} являются присоединенными массами и коэффициентами демпфирования нулевой скорости судна соответственно и U – скорость судна.

U_z – вертикальная скорость сечения относительно воды.

В методе Герритсмй и Бекельмана расчета дополнительного сопротивления рассматривается вертикальная скорость жидкости относительно судна, (Рис 4).

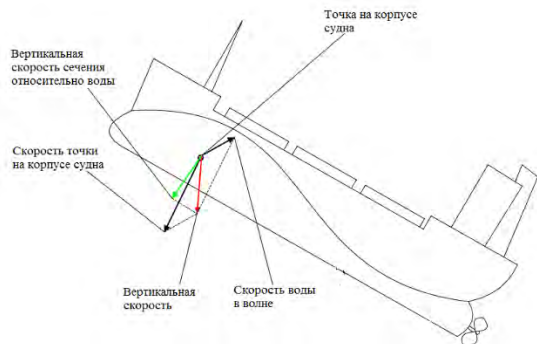


Рис 4. Определение вертикальной скорости сечения относительно воды U_z [1]

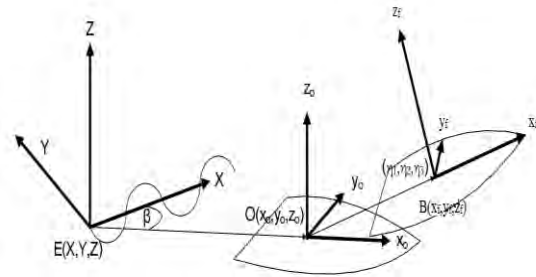


Рис 5. Системы координат [1]

При выводе относительной скорости используются три системы координат, $E(X, Y, Z)$, $O(x_o, y_o, z_o)$ и $B(x_f, y_f, z_f)$ (Рис 5). Земная система координат $E(X, Y, Z)$ зафиксирована в пространстве и имеет свою ось X , направленную по направлению распространения волны. Она также содержит две другие системы координат. $O(x_o, y_o, z_o)$ расположена в среднем положении центра тяжести судна. Это означает, что она движется со скоростью судна по линии с началом в $E(X, Y, Z)$ и под углом β к оси X . Система координат перемещается только в плоскости X, Y в $E(X, Y, Z)$ без вращения. $B(x_f, y_f, z_f)$ фиксируется с судном. Начало $B(x_f, y_f, z_f)$, расположенное в ЦТ, выражается координатами η_1 – продольно–горизонтальная качка, η_2 – поперечно–горизонтальная качка, η_3 – вертикальная качка (Рис 6). Если $B(x_f, y_f, z_f)$ вращается в $O(x_o, y_o, z_o)$ вокруг своего начала, эти вращения выражаются η_4 – бортовая качка (от y_o до z_o), η_5 – килевая качка (от z_o до x_o), η_6 – рысканье (от x_o до y_o). [3]

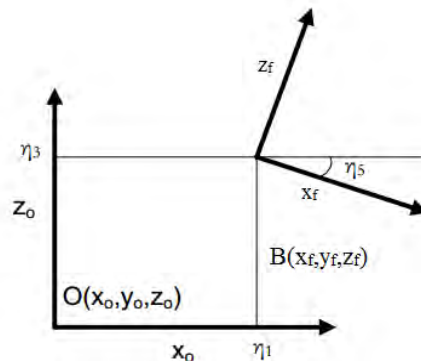


Рис 6. Отношение между $O(x_o, y_o, z_o)$ и $B(x_f, y_f, z_f)$ [1]

4.1. Вывод относительной скорости

Относительная скорость – это скорость частиц воды на судне с фиксированной системой координат

$B(x_f, y_f, z_f)$. Скорости частиц воды в земной фиксированной системе координат $E(X, Y, Z)$ могут быть получены из потенциала скорости волны. [3]

$$\phi = \frac{ig\zeta_a}{\omega} e^{kZ} e^{i(\omega t - kX)} \quad (27)$$

Скорость частицы в $E(X, Y, Z)$:

$$u_E = \frac{\partial \phi}{\partial X} = \omega \zeta_a e^{kZ} e^{i(\omega t - kX)} \quad (28)$$

$$w_E = \frac{\partial \phi}{\partial Z} = i \omega \zeta_a e^{kZ} e^{i(\omega t - kX)} \quad (29)$$

U в направлении X , W в направлении Z . Эти скорости могут быть преобразованы в стационарную систему $B(x_f, y_f, z_f)$ судна для получения относительной скорости. Первые (28) и (29) выражены с помощью X_f , используя следующие соотношения между X в $E(X, Y, Z)$ и x_f в $B(x_f, y_f, z_f)$:

$$X = (Ut + x_0) \cos(\beta)$$

$$x_0 = \eta_1 + x_f \approx x_f$$

Поэтому $X = (Ut + x_f) \cos(\beta) \quad (30)$

Уравнения (28) и (29) становятся

$$u_E = \omega \zeta_a e^{kZ} e^{i((\omega - \frac{\omega^2}{g} U \cos(\beta))t - kx_f \cos(\beta))} \quad (31)$$

$$w_E = i \omega \zeta_a e^{kZ} e^{i((\omega - \frac{\omega^2}{g} U \cos(\beta))t - kx_f \cos(\beta))} \quad (32)$$

Где $\omega_e = \left[\omega - \frac{\omega^2}{g} U \cos(\beta) \right]$

$$u_E = \omega \zeta_a e^{kZ} e^{i(\omega_e t - kx_f \cos(\beta))} \quad (33)$$

$$w_E = i \omega \zeta_a e^{kZ} e^{i(\omega_e t - kx_f \cos(\beta))} \quad (34)$$

Это все еще скорости в $E(X, Y, Z)$, но выраженные через x_f из $B(x_f, y_f, z_f)$. Скорости могут быть преобразованы в движущуюся систему $O(x_0, y_0, z_0)$.

$$w_0 = w_E \quad (35)$$

$$u_0 = -U + u_E \cos(\beta) \quad (36)$$

И превратился в $B(x_f, y_f, z_f)$

$$w_f = \left[(u_0 - \dot{\eta}_1) \eta_5 + w_0 - \dot{\eta}_3 + x_f \dot{\eta}_5 \right] \quad (37)$$

Скорость η_1 продольной-горизонтальной качки можно пренебречь

$$w_f = (u_0 \eta_5 + w_0 - \dot{\eta}_3 + x_f \dot{\eta}_5) \quad (38)$$

Подстановка выражений для u_0 (35) и w_0 (36), u_E (33) и w_E (34). Пренебрегая весьма малым слагаемым $\cos(\beta) \eta_5$, получим U_z вертикальную скорость сечения относительно воды.

$$U_z \approx w_f = -U \dot{\eta}_5 - \dot{\eta}_3 + x_f \dot{\eta}_5 + i \left[\omega \zeta_a e^{kZ} e^{i(\omega_e t - kx_f \cos(\beta))} \right] \quad (39)$$

Где $Z = \frac{A'}{B}$, A' – площадь смоченной поверхности судна, B – ширина судна.

Излучаемая в течение одного периода колебаний энергия также может быть выражена через дополнительное сопротивление. Тогда уравнение (26) принимает вид

$$E = R_{aw} \lambda_\beta = R_{aw} \left(\frac{\lambda}{\cos(\beta)} \right) = R_{aw} \left(\frac{2\pi}{-k \cos(\beta)} \right) \quad (40)$$

Где λ_β – расстояние, преодолеваемое судном при его движении под углом к фронту волны (Рис 7).

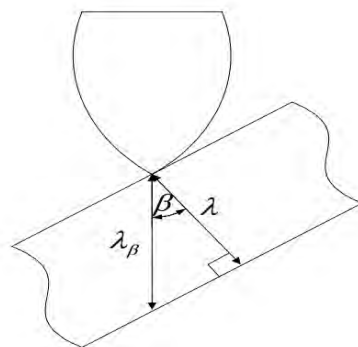


Рис 7. Отношение между λ_β и λ [1]

Для безразмерного дополнительного сопротивления [10], учитывающего продольную качку, можно получить

$$R_{aw} = \frac{R_{AW}}{\rho g \zeta_a^2 (B^2 / L)} = \frac{-k \cos(\beta)}{2\pi} \int_0^T \int_0^L b' U_z^2 dx_f dt \quad (41)$$

5. Анализ результатов

Для изучения качки судна с энергосберегающими крыльевыми элементами на регулярном волнении был выбран следующий диапазон длин волн: λ / L [с 0,4 до 2,5]. Расчеты вертикальной и килевой качки судна проведены при скорости $U = 15,66$ уз и «курсовом» угле $\beta = 180^\circ$. В представленных на рис.

8-13 графиках приняты следующие обозначения: $\frac{\eta_3}{\zeta_a}$

- безразмерная амплитуда вертикальной качки, $\frac{\tilde{\eta}_3}{k\zeta_a}$
 - безразмерная амплитуда килевой качки.
 Характерные величины судна приведены $L = 87,5\text{ м}$,
 $B = 12,7\text{ м}$, $T = 5,5\text{ м}$ и размах крыла $s = 7,5\text{ м}$, хорда $c = 2,5\text{ м}$.

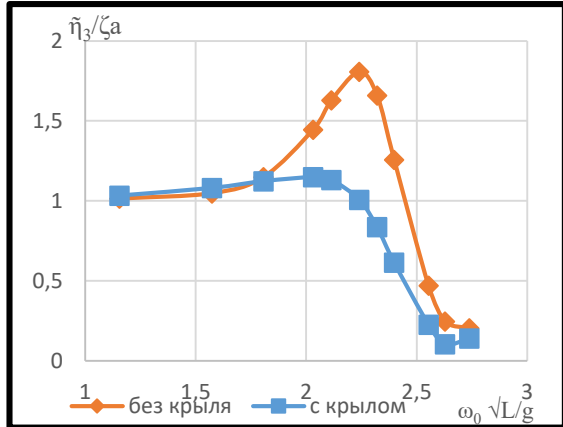


Рис 8. АЧХ вертикальной качки судна при курсовом угле $\beta = 180^\circ$ (крыло в носовой части судна), $U=15,6$ уз

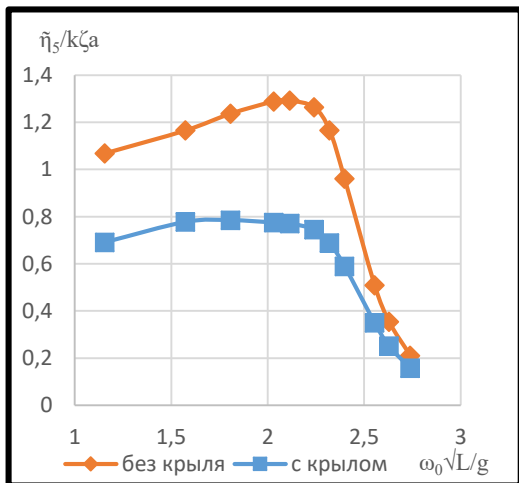


Рис 9. АЧХ килевой качки судна при курсовом угле $\beta = 180^\circ$ (крыло в носовой части судна), $U=15,6$ уз.

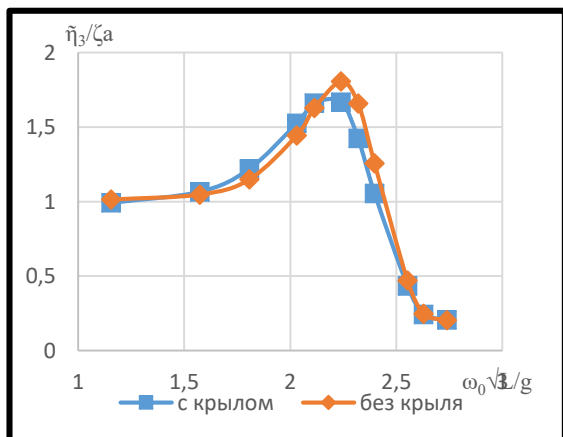


Рис 10. АЧХ вертикальной качки судна при курсовом угле $\beta = 180^\circ$ (крыло в кормовой части судна), $U=15,6$ уз.

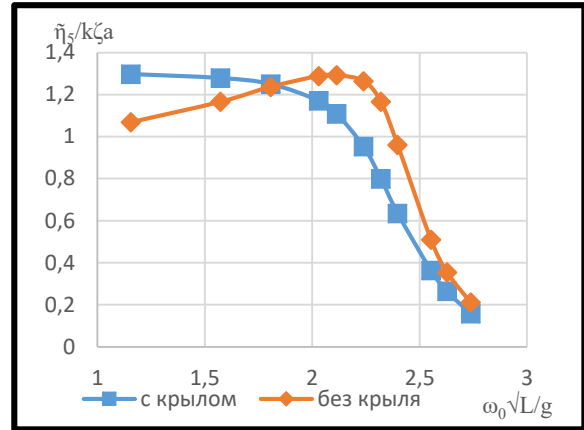


Рис 11. АЧХ килевой качки судна при курсовом угле $\beta = 180^\circ$ (крыло в кормовой части судна), $U=15,6$ уз.

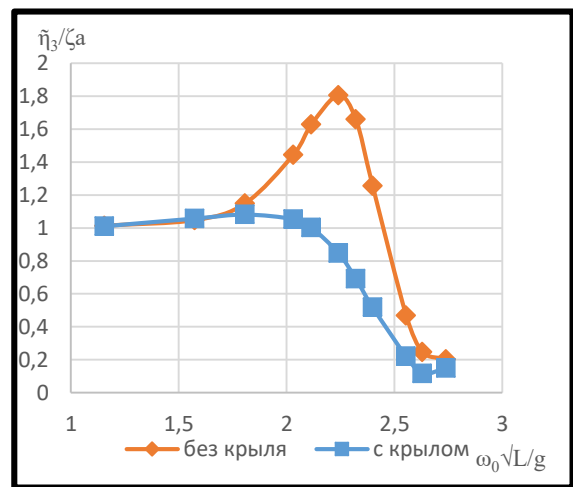


Рис 12. АЧХ вертикальной качки судна при курсовом угле $\beta = 180^\circ$ (крылья в носовой и кормовой частях судна), $U=15,6$ уз.

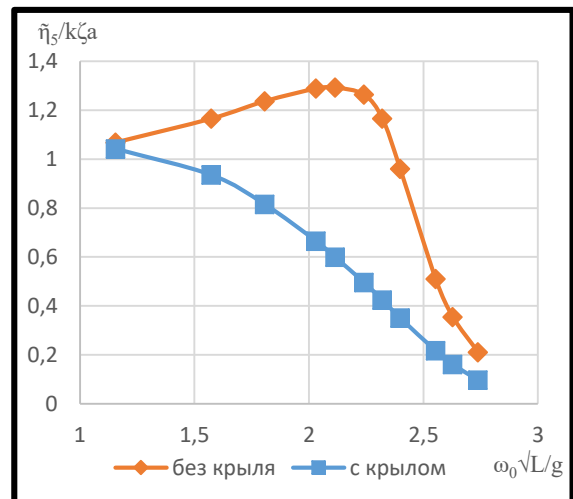


Рис 13. АЧХ килевой качки судна при курсовом угле $\beta = 180^\circ$ (крылья в носовой и кормовой частях судна), $U=15,6$ уз.

Результаты расчета продольной качки для судна с крыльевыми устройствами и без них приведены на Рис 8-13. Из них, в частности, следует, что

дополнительные крыльевые устройства способствуют уменьшению продольной качки, что неоднократно отмечалось в литературе [1,2].

Результаты численного моделирование дополнительного сопротивления сопоставлялись с экспериментальными данными по Фуджи [13], 1975 год и экспериментальными данными по Накамура [14], 1977 год.

Расчеты дополнительного сопротивления судна проведены при числах Фруда $Fn = 0,2$ и $Fn = 0,25$,

«курсовом» угле $\beta = 180^\circ$. Значения дополнительного сопротивления, найденные путем численного моделирования, удовлетворительно согласуются с экспериментальными. На представленных на рис 14-27 графиках используются следующие обозначения:

$$\frac{R_{AW}}{\rho g \zeta_a^2 (B^2/L)}$$

безразмерное дополнительное сопротивление судна.

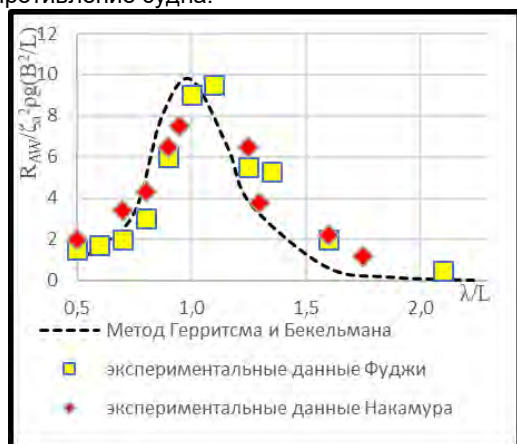


Рис 14. Дополнительное сопротивление контейнеровоза при число Фруда $Fn = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$

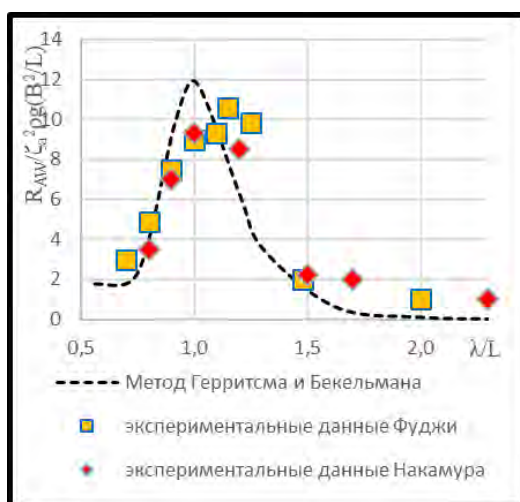


Рис 15. Дополнительное сопротивление контейнеровоза при число Фруда $Fn = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$

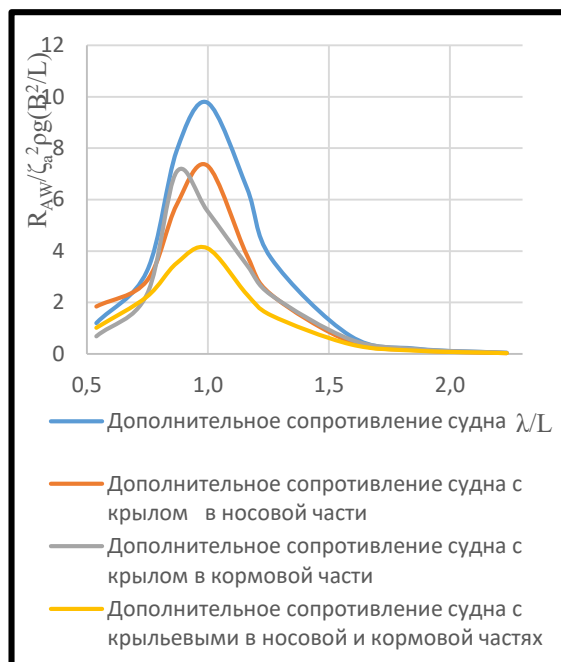


Рис 16. К вычислению дополнительного сопротивления судна при число Фруда $Fn = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$ ($\Lambda = 3$)

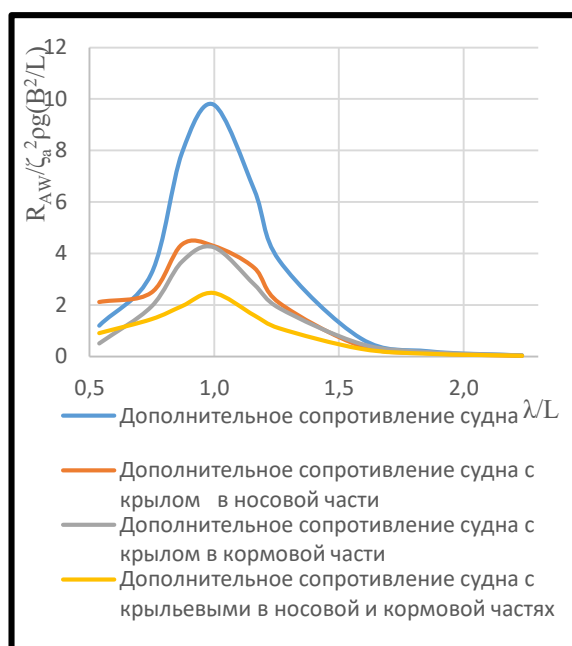


Рис 17. К вычислению дополнительного сопротивления судна при число Фруда $Fn = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$ ($\Lambda = 4$)

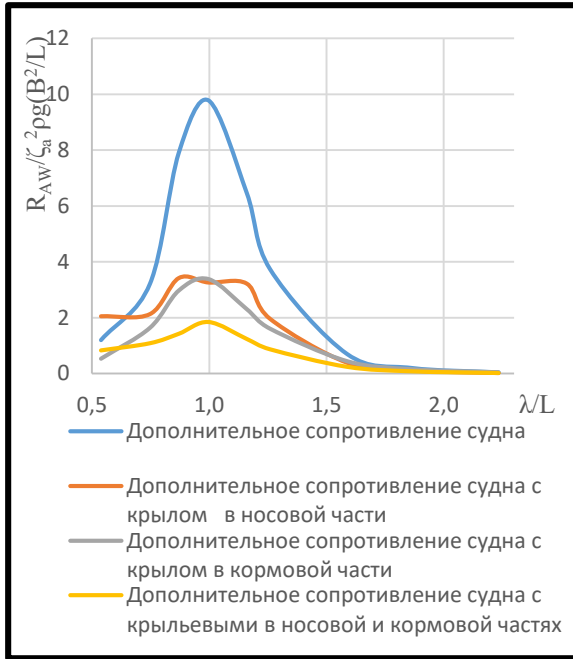


Рис 18. К вычислению дополнительного сопротивления судна при число Фруда $F_n = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$ ($\Lambda = 5$)



Рис 20. К вычислению дополнительного сопротивления судна при число Фруда $F_n = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$ ($\Lambda = 4$)

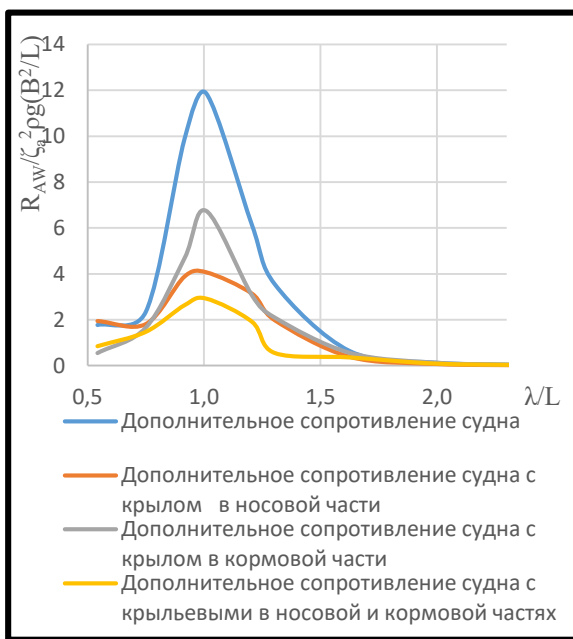


Рис 19. К вычислению дополнительного сопротивления судна при число Фруда $F_n = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$ ($\Lambda = 3$)

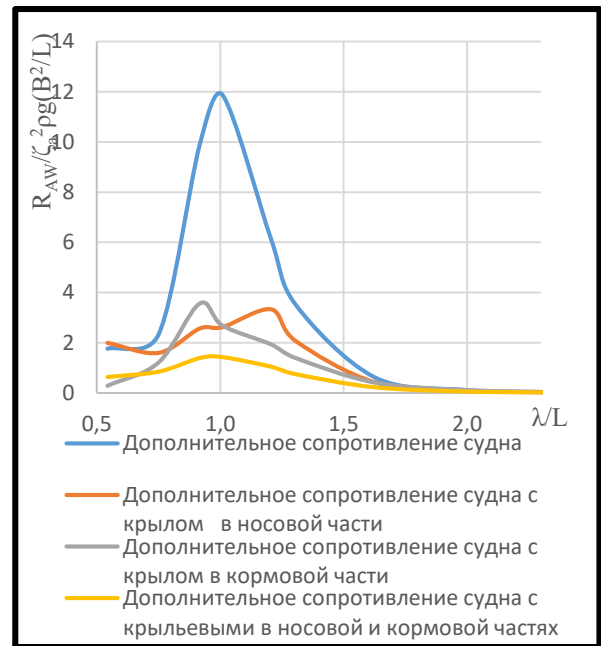


Рис 21. К вычислению дополнительного сопротивления судна при число Фруда $F_n = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$ ($\Lambda = 5$)

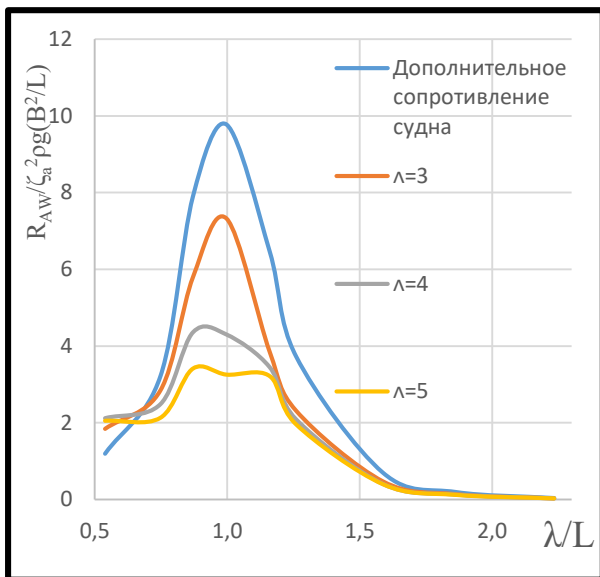


Рис 22. К вычислению дополнительного сопротивления судна и влияние суммарной площади крылевых элементов при число Фруда $F_n = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$, крыло в носовой части судна

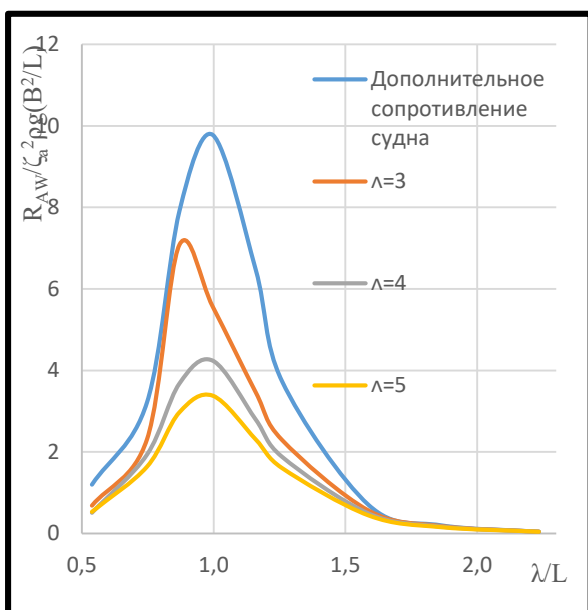


Рис 23. К вычислению дополнительного сопротивления судна и влияние суммарной площади крылевых элементов при число Фруда $F_n = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$, крыло в корме части судна

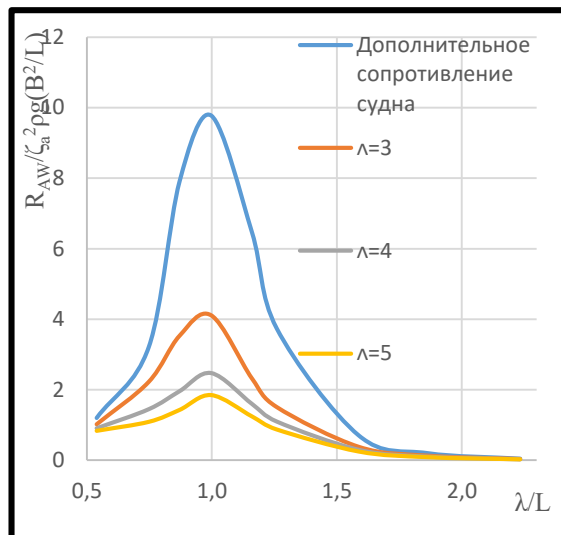


Рис 24. Крылья в носу и корме судна и влияние суммарной площади крылевых элементов при число Фруда $F_n = 0,2$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$

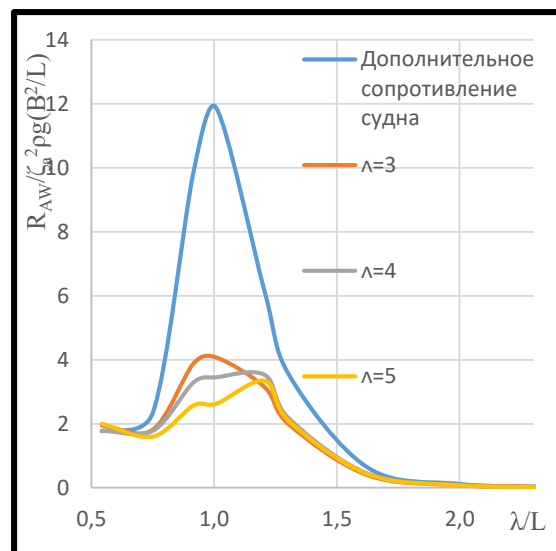


Рис 25. К вычислению дополнительного сопротивления судна и влияние суммарной площади крылевых элементов при число Фруда $F_n = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$, крыло в носовой части судна

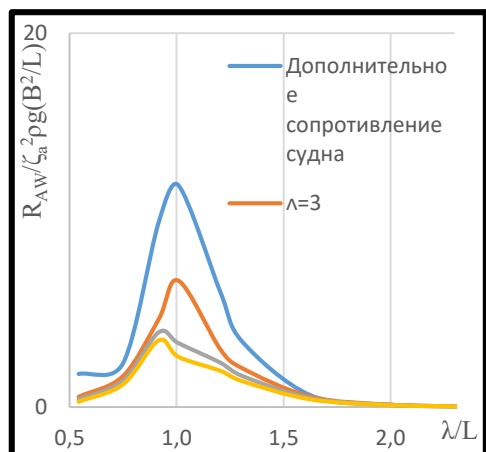


Рис 26. К вычислению дополнительного сопротивления судна и влияние суммарной площади крыльевых элементов при число Фруда $F_n = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$, крыло в корме части судна

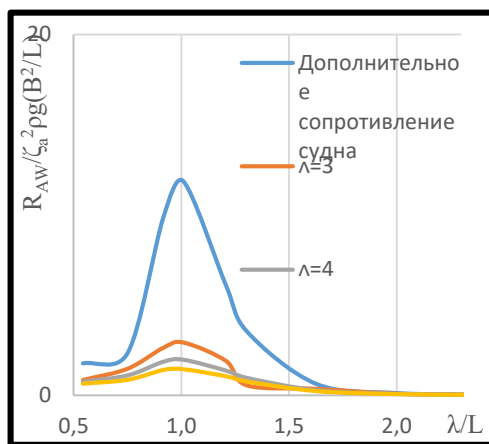


Рис 27. Крылья в носу и корме судна и влияние суммарной площади крыльевых элементов при число Фруда $F_n = 0,25$ и курсовом угле $\beta = 180^\circ$

Выводы

1. В статье предложены расчетные методы, позволяющие в процессе проектирования оценить мореходность морского судна с крыльевыми устройствами, а также возможности направленного влияния на его продольную качку

Автор выражает признательность профессору К.В. Рождественскому за участие в обсуждении этой работы.

2. Из анализа полученных расчетных данных следует:
 - 2.1. Для судов, снабженных энергосберегающими крыльевыми устройствами наблюдается уменьшение продольной качки.
 - 2.2. Эффективность энергосбережения и умерения продольной качки зависит от конфигурации системы (носовое крыло, кормовое крыло, носовое плюс кормовое крылья)
 - 2.3. На встречном волнении носовое крыло в большей степени умеряет продольную качку чем кормовое.
 - 2.4. Предложенный подход позволяет оценить дополнительное сопротивление судна в зависимости от параметров, влияющих на его продольную качку.
 - 2.5. Степень уменьшения дополнительного сопротивления системы зависит от конфигурации системы (носовое крыло, кормовое крыло, носовое плюс кормовое крылья).
 - 2.6. При увеличении площади крыльев дополнительное сопротивление уменьшается, однако одновременно расчет вязкостное сопротивление, что необходимо учитывать при проектировании.
 - 2.7. Разработанный алгоритм может использоваться при изучении возможности стабилизации продольной качки судна с крыльевыми устройствами, а также служить основой для решения задачи о дополнительном сопротивлении.
 - 2.8. Результаты работы могут быть использованы для оценки мореходных качеств судов с энергосберегающими крыльевыми элементами.

Предложенная математическая модель подлежит дальнейшему развитию и совершенствованию. Предложенная математическая модель подлежит дальнейшему развитию и совершенствованию.

Литература

1. Martin Alexandersson. A study of methods to predict added resistance in waves. Master thesis, KTH center of naval Architecture. 2009. 65 p.
2. J.M.J. Journée., W.W. Massie. Offshore hydromechanics. Delft University of Technology. 2001. 570 p.
3. Odd M. Faltinsen. Sea loads on ships and offshore structures. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. 1990. 328 p.
4. John Spencer Avis. Reducing added resistance using an anti-pitching foil. University of British Columbia. Master of Applied Science. Vancouver, Canada. 1989. 106 p.
5. Холодилин А.Н. Носовые и кормовые крылья для успокоения продольной качки судов: дис.; специальность: 05.08.01 – теория корабля и строительная механика / Холодилин А.Н. – ЛКИ.: ФКО, 1968. – 288с.
6. Лузянин А.А. Исследование особенностей продольной качки и дополнительного сопротивления морских составных судов на волнении: дис.; специальность: 05.08.01 – теория корабля и строительная механика / Лузянин А.А. – СПбГМТУ.: ФКО, 1997. – 152с.
7. Рождественский. К.В., Рыжов. В.А. Математические модели в теории машущего крыла. Учебное пособие. Л., 1985. 103 с.

8. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical modeling of marine robots with energy-saving wing devices. International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration. MaineRobotics 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. p 360-369.
9. Рыжов. В.А. Гидродинамика пропульсивных и энергосберегающих систем с колеблющимися крыльевыми элементами. д.т.н. диссертация. СПбГМТУ., 1997. 394 с.
10. Ir. Gerritsma., W. Beukelman. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo. International Shipbuilding Progress, vol. 19, no. 217, pp. 285-293, 1972.
11. Зин Мин Хтет., Рождественский Кирилл Всеволодович. Математическое моделирование судна, движимого энергией волн. Морские интеллектуальные технологии, № 1(43), стр.32-38. 2019.
12. Рождественский. К.В. Математический модуль машущего крыла для задач моделирования судов, движимых энергией волн. Морские интеллектуальные технологии, № 1(43), стр.46-51. 2019.
13. Fujii H., Takahashi T. Experimental study on resistance increase of a ship in regular oblique waves. Proc. 14th ITTC, volume 4, 1975. p 351-360.
14. Nakamura S. Added resistance and propulsive performance. International seminar on wave resistance. February 3-5, 1976. Tokyo.

References

1. Martin Alexandersson. A study of methods to predict added resistance in waves. Master thesis, KTH center of naval Architecture. 2009. 65 p.
2. J.M.J. Journée., W.W. Massie. Offshore hydromechanics. Delft University of Technology. 2001. 570 p.
3. Odd M. Faltinsen. Sea loads on ships and offshore structures. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. 1990. 328 p.
4. John Spencer Avis. Reducing added resistance using an anti-pitching foil. University of British Columbia. Master of Applied Science. Vancouver, Canada. 1989. 106 p.
5. Kholodilin A.N. Nosovyie i kormovyie kryl'ya dlya uspokoyeniya prodolnoy kachki sudov [Bow and stern wings to reduce longitudinal motions of ships]: dis.; spetsial'nost': 05.08.01 – teoriya korablya i stroitel'naya mekhanika / Kholodilin A.N. – LKI.: FKO, 1968. – 288 p..
6. Luzyanin A.A. Issledovaniye osobennostey prodol'noy kachki i dopolnitel'nogo soprotivleniya morskikh sostavnykh sudov na volnenii [Study of features of longitudinal motions and added resistance of marine ships in waves]: dis.; spetsial'nost': 05.08.01 – teoriya korablya i stroitel'naya mekhanika / Luzyanin A.A. – SPbGMTU.: FKO, 1997. – 152 p.
7. Rozhdestvensky. K.V., Ryzhov. V.A. Matematicheskiye modeli v teorii mashushchego kryla [Mathematical models in the theory of a flapping wing]. Uchebnoye posobiye. L., 1985. 103 s.
8. Rozhdestvensky K.V., Zin Min Htet. Mathematical modeling of marine robots with energy-saving wing devices. International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration. MaineRobotics 2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. p 360-369.
9. Ryzhov. V.A. Gidrodinamika propul'sivnykh i energosberegayushchikh sistem s koleblyushchimisya kryl'yevymi elementami [Hydrodynamics of propulsive and energy-saving systems with oscillating wing elements]. d.t.n. dissertatsiya. SpBGMTU, 1997. s 394.
10. Ir. Gerritsma., W. Beukelman. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo. International Shipbuilding Progress, vol. 19, no. 217, pp. 285-293, 1972.
11. Zin Min Htet., Rozhdestvensky Kirill Vsevolodovich. Matematicheskoye modelirovaniye sudna, dvizhimogo energiyey voln [Mathematical modeling of a ship, propelled by wave power] . Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, № 1(43), стр.32-38. 2019.
12. Rozhdestvensky. K.V. Matematicheskiy modul' mashushchego kryla dlya zadach modelirovaniya sudov, dvizhimykh energiyey voln [Mathematical module of a flapping wing for problems of modeling ships, propelled by wave power] . Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, № 1(43), стр.46-51. 2019.
13. Fujii H., Takahashi T. Experimental study on resistance increase of a ship in regular oblique waves. Proc. 14th ITTC, volume 4, 1975. p 351-360.
14. Nakamura S. Added resistance and propulsive performance. International seminar on wave resistance. February 3-5, 1976. Tokyo.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зин Мин Хтет, аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: zinmin.353828@gmail.com

Zin Min Htet, Ph.D student, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, Saint-Petersburg State marine technical university Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: zinmin.353828@gmail.com

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.034

УДК 629.12.001.2

Разработка и исследование математической модели проектирования патрульного катера для Союза Мьянма

А.И. Гайкович¹, Н.В. Никитин¹, Пьяе Соне¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье описывается математическая модель проектирования для обоснования концепции патрульного катера, предназначенного для Союза Мьянма. Основные кораблестроительные элементы определяются как результаты решения задачи математического программирования (оптимизации). В состав математической модели входят расчеты нагрузки, вместимости, остойчивости, ходкости, запаса плавучести. Критерием эффективности взято отношение вероятности перехвата нарушителя к приведенным годовым затратам. Для решения оптимизационной задачи используется алгоритм случайного поиска. Для реализации разработанной математической модели проектирования создан программный комплекс модульной архитектуры в оболочке DELPHI. В рамках исследования математической модели оценивалась её адекватность, чувствительность и устойчивость. Результаты исследования оказались удовлетворительными, что доказывает возможность применения разработанной математической модели для решения проектных задач на начальных стадиях разработки проекта патрульного катера.

Ключевые слова: проектирование, патрульный катер, математическая модель, оптимизация

Development and research of the mathematical model of designing a patrol boat for the Union Myanmar

Alexander I. Gaikovich¹, Nikolai V. Nikitin¹, Pyae Sone¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article describes a mathematical design model to substantiate the concept of a patrol boat intended for the Union of Myanmar. The main shipbuilding elements are defined as the results of solving the problem of mathematical programming (optimization). The mathematical model includes calculations of the load, capacity, stability, propulsion, stock of buoyancy. The efficiency criterion is the ratio of the probability of interception of the intruder to the given annual costs. To solve the optimization problem, a random search algorithm is used. To implement the developed mathematical design model, a software package of modular architecture in the DELPHI shell was created. As part of the study of the mathematical model, its adequacy, sensitivity, and stability were evaluated. The research results were satisfactory, which proves the possibility of using the developed mathematical model to solve design problems in the initial stages of the design of a patrol boat project.

Keywords: design, patrol boat, mathematical model, optimization

Введение

Республика Союз Мьянма находится на западной части полуострова Индокитай в Юго-Восточной Азии между Индийского и Тихого океанов. Длина береговой линии составляет в общей сложности 1385 миль и прибрежные районы страны имеют важнейшее значение для экономики и безопасности страны.

Основными угрозами для Мьянмы с морского направления являются: браконьерский лов морепродуктов, контрабанда и наркотический трафик.

Поэтому, для Мьянмы является актуальным создание полицейских сил, оперирующих как в морских, так и в речных районах. Основными средствами полиции и береговой охраны должны стать многочисленные патрульные катера. Причем этот класс кораблей по своим кораблестроительным характеристикам должен соответствовать возможностям судостроительной отрасли Мьянмы.

1. Построение математической модели проектирования патрульного катера (ПК)

Обоснование концепции ПК базируется на системном анализе и принципе оптимизации.

Общая формулировка задачи оптимизации применительно к проектированию ПК имеет вид [1], [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \mathbf{C}(C_1, \dots, C_q) \\ \mathbf{X} &= \mathbf{X}(X_1, \dots, X_n) \\ (\mathbf{X})_{\min} &\leq \mathbf{X} \leq (\mathbf{X})_{\max} \\ G_j(\mathbf{X}, \mathbf{C}) &\geq A_j(\mathbf{C}), \quad j=1, \dots, m \\ Z(\mathbf{X}, \mathbf{C}) &\rightarrow \text{extr} \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{C} – вектор технического задания (ТЗ) на проектирование; \mathbf{X} – вектор оптимизируемых параметров проекта (переменных), компоненты вектора \mathbf{X} имеют ограничения на диапазон возможных значений; $G_j(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ – оценки j -х качеств корабля; $A_j(\mathbf{C})$ – требования к j -м качествам; $Z(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ – критерий эффективности или функция цели.

Компонентами вектора технического задания в математической модели проектирования приняты следующие группы.

К элементам технического задания относятся:

- код проекта;
- полная скорость хода катера, уз;
- дальность плавания полным ходом, мили;
- автономность по провизии, сутки;
- численность экипажа, чел.;

- состав вооружения;
- фирма-изготовитель главных двигателей;
- число валов (предусмотрена 2-х вальная установка).

К параметрам, необходимым для экономических расчетов:

- удельные стоимости (цена за 1 тонну) по разделам нагрузки;
- удельная стоимость (цена за 1 кВт) раздела «Энергетическая установка»;
- стоимость разделов «Защита», «Вооружение», «Боезапас»;
- цена 1 тонны топлива;
- средняя суточное содержание одного члена экипажа;

Параметры, описывающие сценарий использования патрульного катера:

- скорость цели-нарушителя;
- средняя дальность обнаружения цели;
- угол сектора наблюдения;
- время обследования сектора наблюдения;

Параметры, назначаемые проектантом:

- коэффициент общей полноты (из диапазона значений для моделей серий Грота и Нордстрёма);
- габариты надстройки;
- норма сухой провизии на человека в сутки;
- норма пресной воды на человека в сутки;
- средняя масса человека с багажом.

Информация по прототипам:

- измерители нагрузки по разделам;
- относительные ординаты судовой поверхности;
- относительные ординаты кривых элементов теоретического чертежа.

Вектор оптимизируемых параметров проекта (переменных) **X** в математической модели проектирования содержит следующие компоненты:

- длина по конструктивной ватерлинии (КВЛ);
- ширина по КВЛ;
- осадка, соответствующая полному водоизмещению, T ;
- высота борта на миделе, H .

Коэффициент общей полноты считается заданным параметром, что определяется характеристиками моделей, использованных для расчетов ходкости и позволяет значительно упростить математическую модель, отказавшись от нелинейного перестроения теоретического чертежа.

Система параметрических ограничений строится на основании статистических исследований главных размерений патрульных катеров.

Система функциональных ограничений задачи оптимизации.

1. Ограничения, связанные с соотношением главных размерений и расчетами ходкости [3].

Относительная длина $l = L/V^{1/3}$ не выходит из возможного диапазона:

$$5,2 \leq l \leq 8,4 \quad (2)$$

Число Фруда по водоизмещению не выходит из возможного диапазона:

$$1,0 \leq Fr_{\delta} \leq 2,5 \quad (3)$$

2. Ограничения по полезной нагрузке в математической модели проектирования патрульного катера рассматривается как неравенство.

Под полезной нагрузкой в данном исследовании подразумеваются массы разделов «Вооружение», «Боезапас» и «Защита». Вид функционального ограничения:

$$\gamma \delta L B T - \sum_{i=1, i \neq 6,7,8,10}^{19} G_i \geq G_6 + G_7 + G_8 \quad (4)$$

где γ – плотность воды, L – длина катера по КВЛ, B – ширина катера, T – осадка в полном грузу, G_i – массы соответствующих разделов нагрузки, i – индексы разделов нагрузки.

3. Ограничения по вместимости. Это ограничение может быть представлено в виде балансов объемов, площадей и габаритов. Возможной формой уравнения вместимости для патрульных катеров являются разновидности уравнения В.Л. Поздюнина полученные в работе [4]:

$$W_{PK} \geq W_{\phi} + W_{\text{Ця}} + W_{\text{Эк}} + W_{\text{Мо}} + W_A \quad (5)$$

$$W_{\text{нк}} \geq W_{\text{ХБ}} + W_{\text{ХР}} \quad (6)$$

$$S_{\text{РП}} \geq S_{\text{ХР}} + S_{\text{ХБ}} + S_{\text{ВР}} + S_{\text{Л}} \quad (7)$$

$$L \geq L_{\phi} + L_{\text{Ця}} + L_{\text{Эк}} + L_{\text{Мо}} + L_A \quad (8)$$

$$L_{\text{РП}} \geq L_{\text{ХР}} + L_{\text{ХБ}} + L_{\text{ВР}} + L_{\text{Л}} \quad (9)$$

где $W_{\text{Р}}, W_{\text{нк}}$ – располагаемые объемы в корпусе и надстройке соответственно; $W_{\phi}, W_{\text{Ця}}, W_{\text{Эк}}, W_{\text{Мо}}, W_A, W_{\text{ХБ}}, W_{\text{ХР}}$ – требуемые объемы форпика, цепного ящика, помещения экипажа, машинного отделения, ахтерпика, хозяйственного блока, ходовой рубки соответственно; $S_{\text{РП}}$ – располагаемая площадь на верхней палубе; $S_{\text{ХР}}, S_{\text{ХБ}}, S_{\text{ВР}}, S_{\text{Л}}$ – требуемые площади для ходовой рубки, хозяйственного блока, размещения вооружения и досмотровой лодки соответственно; L – длина катера по конструктивной ватерлинии (КВЛ); $L_{\phi}, L_{\text{Ця}}, L_{\text{Эк}}, L_{\text{Мо}}, L_A$ – требуемые длины для размещения форпика, цепного ящика, помещения экипажа, машинного отделения, ахтерпика соответственно; $L_{\text{РП}}$ – длина катера по верхней палубе; $L_{\text{ХР}}, L_{\text{ХБ}}, L_{\text{ВР}}, L_{\text{Л}}$ – требуемые длины для размещения ходовой рубки, хозяйственного блока, размещения вооружения, досмотровой лодки соответственно.

Располагаемый объем корпуса может быть определен по известному соотношению

$$W_{PK} = V \cdot (H / T)^{\alpha \delta} \quad (10)$$

где $V = \delta \cdot L \cdot B \cdot T$ – объемное водоизмещение, L – длина по КВЛ, B – ширина, H – высота борта, T – осадка, α – коэффициент полноты конструктивной ватерлинии, δ – коэффициент общей полноты. Располагаемые объемы надстройки и соответствующие располагаемые площади и габариты определяются принятым архитектурно-конструктивным типом и значениями оптимизируемых главных размерений.

Требуемые объемы в корпусе рассчитываются на основании статистических исследований

4. Группа требований по начальной остойчивости и к остойчивости на больших углах крена.

Начальная поперечная метацентрическая высота h была не меньше:

$$h \geq 0,15 \text{ м} \quad (11)$$

Значение максимального плеча диаграммы Рида l_{\max} должно быть не меньше:

$$l_{\max} \geq 0,2 \text{ м} \quad (12)$$

Значение угла крена, соответствующего максимальному плечу диаграммы Рида должно быть не меньше:

$$\theta_{\max} \geq 30^\circ \text{ град.} \quad (13)$$

Значение угла заката диаграммы статической устойчивости должно быть не меньше:

$$\theta_{\text{зак}} \geq 60^\circ \text{ град.} \quad (14)$$

5. Требование к непотопляемости.

Относительный запас плавучести $V_{\text{зпо}}$ должен быть не меньше заданного $V^*_{\text{зпо}}$:

$$V_{\text{зпо}} \geq V^*_{\text{зпо}} \quad (15)$$

6. Требование ходкости.

Суммарная мощность выбранных двигателей N_{Σ} должна быть не меньше расчетной мощности для обеспечения заданной скорости полного хода.

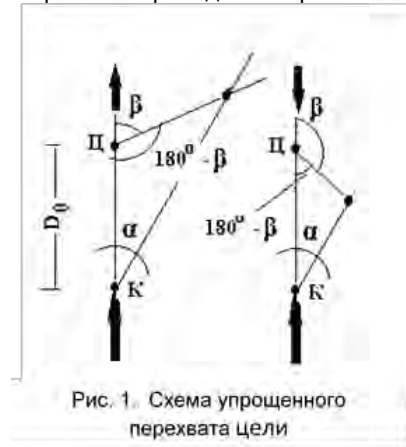
Формирование критерия. Для выбора наилучшего варианта в математической модели проектирования патрульного катера используется удельный критерий типа «стоимость – эффективность»:

$$Z(\mathbf{X}, \mathbf{C}, \cdot) = P_{\text{об}} \cdot P^*_{\Pi} / (E_{\Sigma} + C) \rightarrow \max \quad (16)$$

где $P_{\text{об}}$ – вероятность обнаружения нарушителя; P^*_{Π} – осредненная вероятность перехвата

нарушителя внутри экономической зоны; Π – строительная стоимость патрульного катера; E – нормативный коэффициент; C – годовые эксплуатационные расходы.

Схема перехвата приведена на рис. 1.



Осредненная вероятность перехвата равна:

$$P^*_{\Pi} = \sum_i^I \sum_j^J P_{\Pi ij}^* \quad (17)$$

где $P_{\Pi ij}$ – вероятность перехвата нарушителя внутри экономической зоны на i -м курсовом угле цели $q_{\text{ц0}}$ и j -м расстоянии цели до границы экономической зоны, $m = I + J$ – число перехватов.

В математической модели патрульного катера рассматриваются курсовые углы цели правого борта через 10° (учитывая симметричность задачи), т.о. $I = 18$. Дистанция цели до границы образует ряд от 12 до 180 миль, т.о. $J = 15$. В этом случае число перехватов составит $m = 270$.

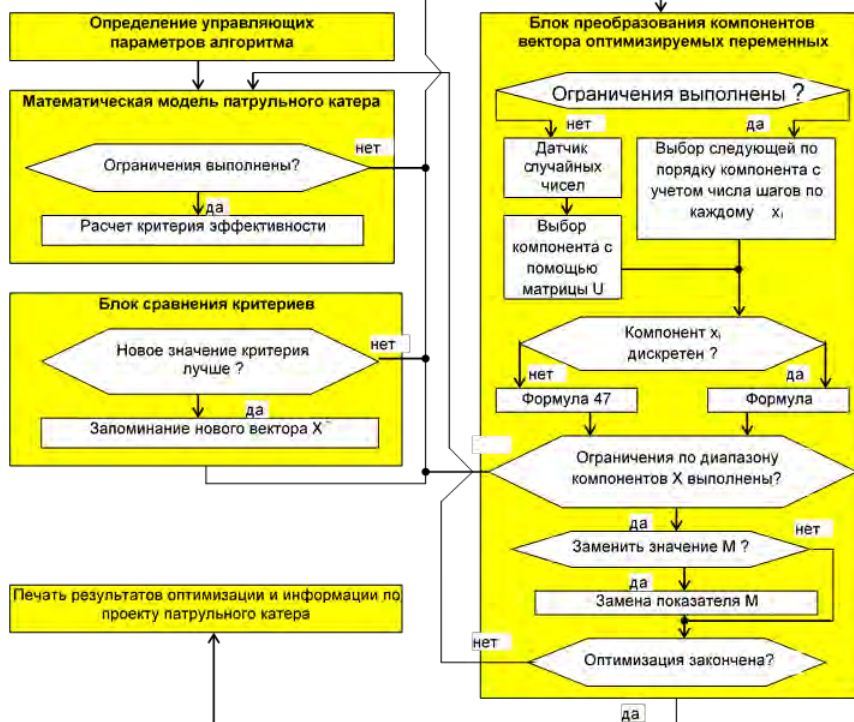


Рис. 2. Блок – схема алгоритма случайного поиска

2. Описание алгоритма оптимизации характеристик патрульного катера (ПК)

Сформулированная задача оптимизации патрульного катера (1) относится к классу задач нелинейного программирования.

Блок-схема алгоритма случайного поиска принятого для решения задачи оптимизации патрульного катера АСП изображена на рис. 2.

Формула шага оптимизации для непрерывных компонент вектора X имеет вид:

$$x_i = x_i^* + [(x_i)_{\max} - (x_i)_{\min}] \cdot Y^M \quad (18)$$

где x_i - i -й компонент вектора оптимизируемых переменных; x_i^* - i -й компонент, соответствующий предыдущему удачному шагу оптимизации; $(x_i)_{\max}$;

$(x_i)_{\min}$ - границы диапазона допустимых значений x_i ;
 Y - случайная величина, принимающая любое значение на сегменте $[-1,1]$ с равной вероятностью;
 M - целое положительное нечетное число.

Алгоритм, преобразующий компоненты вектора оптимизируемых переменных по формуле (18) сходится по вероятности к решению экстремальной задачи.

3. Описание программного комплекса, реализующего математическую модель

Программный комплекс, реализующий математическую модель проектирования патрульного катера, построен на языке Pascal в оболочке Delphi с использованием модульного принципа.

Архитектура комплекса показана на рис. 4.

Вид типового интерфейса модуля комплекса показан на рис. 5.

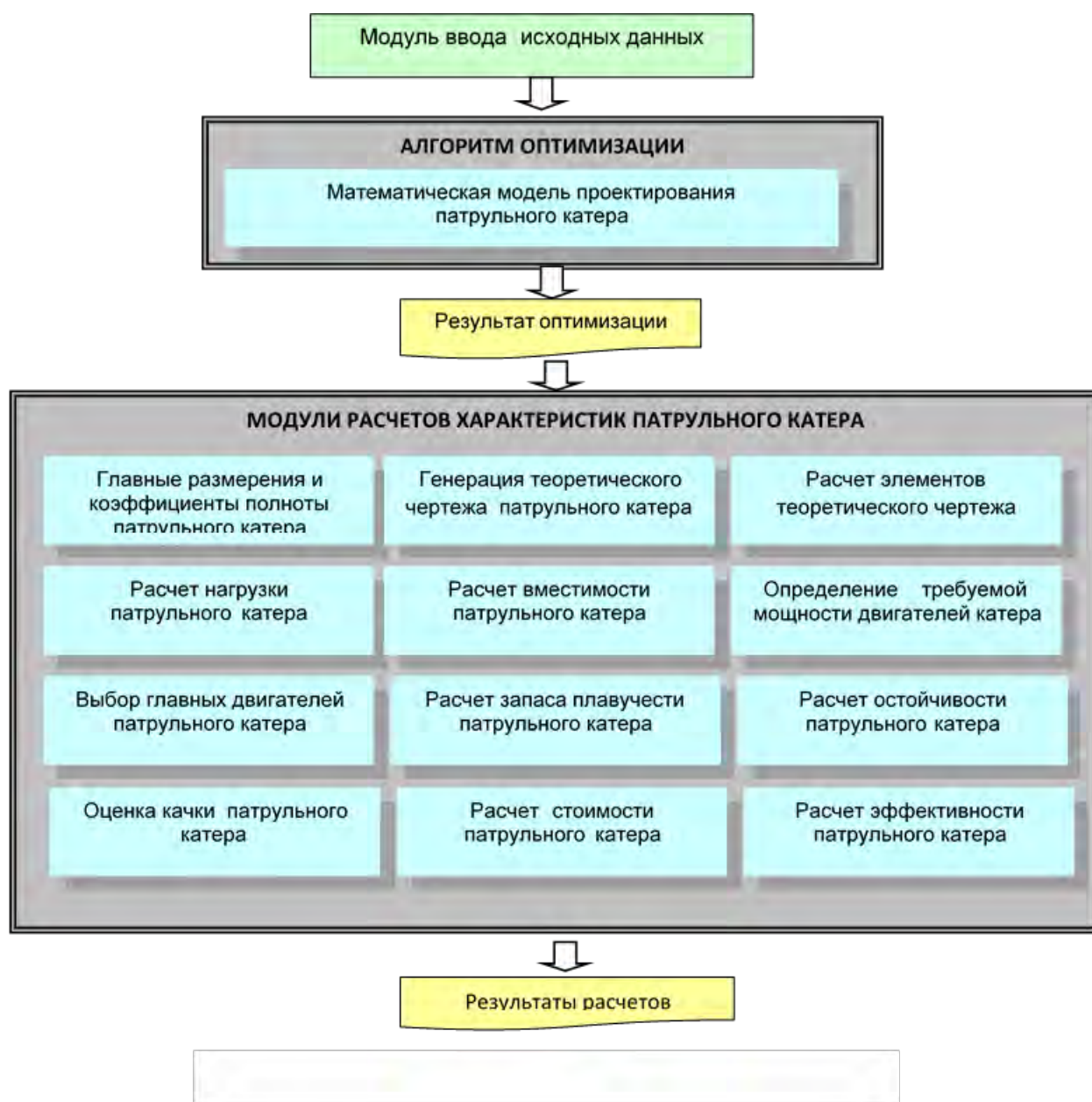




Рис. 5. Пример формы интерфейса программного комплекса

4. Исследование математической модели проектирования патрульного катера

Для оценки возможности использования разработанной модели проектирования патрульного катера она была верифицирована с использованием разработанного программно-методического комплекса..

Часть модулей верифицировалось в процессе разработки соответствующих алгоритмов.

Однако, значения основных кораблестроительных элементов, могут быть сопоставимы в

Однако, значения основных кораблестроительных элементов, могут быть сопоставимы в приблизительно принятых условиях эксплуатации для реального катера.

В качестве базы приняты катера, характеристики которых закрывают диапазон характеристик катеров

оперирующих в экономической зоне (табл. 1). Оценки табл.1. позволяют считать, что адекватность математической модели патрульного катера достаточна для применения на начальных стадиях проектирования на уровне технического предложения. Верификация модели в целом оказалась сложной задачей.

Главное препятствие состоит в том, что принятый в математической модели критерий эффективности патрульного катера вполне оригинален, а критерии сопоставляемых реальных катеров неизвестны.

Исследование устойчивости модели. Условие устойчивости модели для решения задачи синтеза технической системы может быть сформулировано как задание некоторой окрестности δ для начального значения вектора C , при которой мера изменения вектора оптимизируемых переменных X не превысит заранее заданной величины ε .

Таблица 1

Результаты оценки адекватности математической модели

Тип катера	D, т		L, м		B, м		T, м		H, м		δ		N, кВт		Z	
	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет
DG-30M	95	73,1	30	24,61	6,8	6,9	1,4	1	3,8	2,1	0,325	0,412	1800	1929	3611	3382
45M-HSPC	260	225	45	44,99	9,5	7,9	1,6	1,5	4,5	4,3	0,371	0,412	5964	3849	7000	6200

D – полное водоизмещение, L – длина по КВЛ, B – ширина, T – осадка, H – высота борта, δ – коэффициент общей полноты, N – мощность главных двигателей, Z – критерий эффективности

– Основные элементы технического задания показаны ниже:

- полная скорость хода катера 30 уз;
- дальность плавания полным ходом 500 миль автономность по провизии 1 сутки;
- численность экипажа 8 чел.
- Значения оптимизируемых параметров проекта:

–длина по КВЛ 40 м;

- ширина по КВЛ 7,5 м;
- высота борта на миделе 2,1 м;
- осадка полного водоизмещения 3,3 м.
- Рассматривается влияние изменение длины, ширины и высоты борта на критерий в математической модели патрульного катера.

Пример такого исследования изменения ширины показан на рис. 6

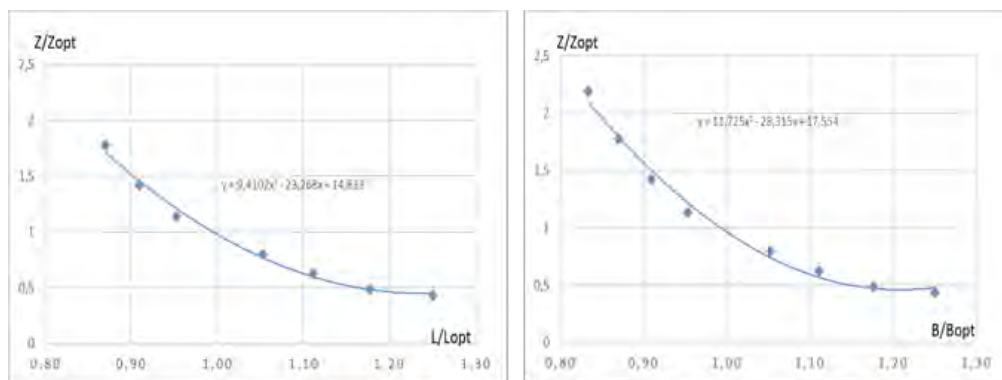


Рис. 6. Пример исследования устойчивости математической модели проектирования

На основании аппроксимация графиков, типа показанных на рис. 6, получены зависимости для производных для критерия эффективности по оптимизируемым переменным:

$$(Z/Z_{opt}) = 9,41(L/L_{opt})^2 - 23,3(L/L_{opt}) + 14,8 \quad (19)$$

$$(Z/Z_{opt}) = 11,7(B/B_{opt})^2 - 28,3(B/B_{opt}) + 17,6 \quad (20)$$

$$(Z/Z_{opt}) = 14,4(H/H_{opt})^2 - 33,7(H/H_{opt}) + 20,1 \quad (21)$$

Исследование чувствительности модели.

Чувствительность характеризует направление и скорость изменения критерия эффективности при изменении ограничений задачи оптимизации. Здесь

также можно говорить о построении функций производных dZ/dG_i , где Z - критерий эффективности, а G_i - соответствующие оценки нормируемых качеств проектируемой системы в рамках оптимизационной задачи.

Зависимостей, непосредственно связывающих критерий эффективности задачи оптимизации не существует, и она может быть построена в ходе вычислительных экспериментов.

Примеры таких зависимостей для нормируемой начальной метацентрической высоты и задаваемой скорости хода показаны на рис. 7.

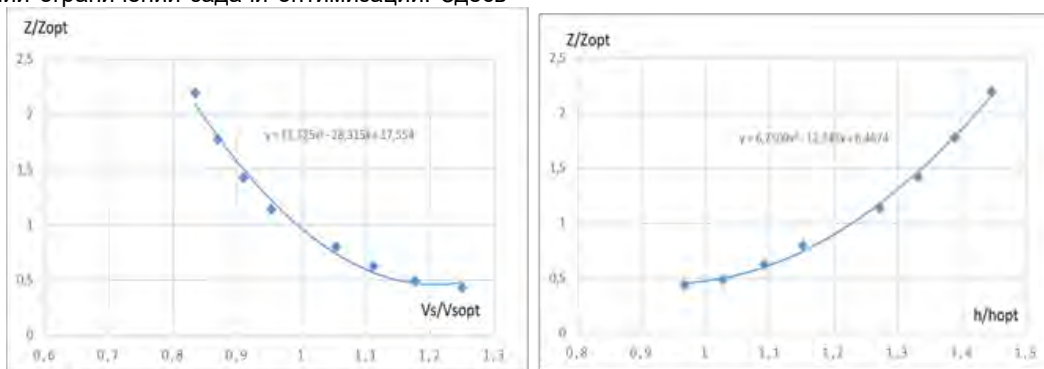


Рис. 7. Пример исследования чувствительности модели проектирования

На основании аппроксимация графиков на рис. 7 получены зависимости для производных для критерия эффективности по ограничениям полной скорости и начальной метацентрической высоты:

$$(Z/Z_{opt}) = 11,7(v_s/v_{s\ opt})^2 - 28,3(v_s/v_{s\ opt}) + 17,6 \quad (22)$$

$$(Z/Z_{opt}) = 6,75(h/h_{opt})^2 - 12,7(h/h_{opt}) + 6,47 \quad (23)$$

Исследование конструкторских решений на модели проектирования катера. Комплекс

программ, реализующих математическую модель проектируемого патрульного катера позволяет оценить отдельные конструкторские решений в ходе проектирования. Примером может послужить оценка влияние толщины бронирования катера на его цену, водоизмещение при различных скоростях хода. Такая оценка показана на рис. 8.

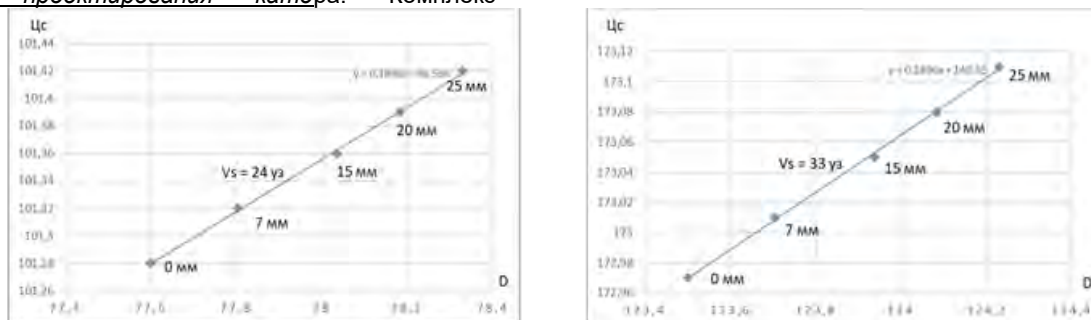


Рис. 8. Взаимовлияние водоизмещения, цены и толщины брони при разных скоростях хода

Созданная проектирования оптимизированного	Заключение математическая патрульного для условий	модель катера, Республики	Мьянма, может на основании проведенных исследований использовать для обоснования его характеристик на начальных стадиях.
--	---	---------------------------------	--

Литература

1. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов в 2-х томах. Т.1 «Анализ и синтез системы «Корабль» - СПб., Изд. «МОРИНТЕХ», 2014, 819 с.
2. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов в 2-х томах. Т.2 «Анализ и синтез системы «Корабль» - СПб., Изд. «МОРИНТЕХ», 2014, 872 с.
3. Гайкович А.И., Никитин Н.В., Пьяе Соне. Определение мощности главных двигателей мореходных катеров на начальных стадиях проектирования. -- "Морские интеллектуальные технологии", 2017, №4 (38), т. 1, стр. 73 – 77
4. Гайкович А.И., Никитин Н.В., Пьяе Соне. Уравнение вместимости патрульного катера для республики Мьянма. -- "Морские интеллектуальные технологии", 2019, №2 (44), т. 1, стр. 52 – 55

References

1. Gaykovich A.I. Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov [Theory of design of displacement ships and vessels] v 2-kh tomakh. T.1 «Analiz i sintez sistemy «Korabl'» - SPb., Izd. «MORINTECH», 2014, 819 s.
2. Gaykovich A.I. Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov [Theory of design of displacement ships and vessels] v 2-kh tomakh. T.2 «Analiz i sintez sistemy «Korabl'» - SPb., Izd. «MORINTECH», 2014, 872 s.
3. Gaykovich A.I., Nikitin N.V., P'yaye Sone. Opredeleniye moshchnosti glavnykh dvigateley morekhodnykh katerov na nachal'nykh stadiyakh proyektirovaniya [Determination of power of main engines seagoing boats in the initial stages of designing]. -- "Morskiye intellektual'nyye tekhnologii", 2017, №4 (38), t. 1, str. 73 – 77
4. Gaykovich A.I., Nikitin N.V., P'yaye So-ne. Uravneniye vmestimosti patrol'nogo katera dlya respublik M'yanma [The capacity equation of patrol boat for republuc M'yanma]. -- "Morskiye intellek-tual'nyye tekhnologii", 2019, №2 (44), t. 1, str. 52 – 55

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Иосифович Гайкович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: a_gaikov@mail.ru

Alexander I. Gaikovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: a_gaikov@mail.ru

Николай Васильевич Никитин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: morintex_spb@mail.ru

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

Пьяе Соне, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kogugu90@gmail.com

Pyae Sone, graduate student, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: kogugu90@gmail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.036
УДК 629.5.021.001.76

Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна

Г.Б. Крыжевич¹, А.Р. Филатов²

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

²Крыловский государственный научный центр

Аннотация Объектом исследования является крышка люкового закрытия сухогрузного судна, служащая для обеспечения непроницаемости грузовых помещений и перевозки на ней грузов и обеспечивающая безопасность сухогрузных судов и осуществляемой на них морской перевозки грузов. Большая материалоемкость крышек снижает экономическую эффективность судна, ведет к необходимости использования мощных и массогабаритных средств подъема крышек (для съемных люковых закрытий), либо поворота и передвижения крышек (для шарнирно-откидных закрытий). Целью статьи является существенное снижение материалоемкости крышек люкового закрытия за счет рационального выбора их материала и конструктивного оформления при одновременном обеспечении требуемого уровня их надежности. Параметрическая оптимизация традиционной стальной крышки люкового закрытия сухогрузного судна проекта RSD59 может привести к снижению ее массы не более чем на 15-17%. Поэтому для достижения цели работы решается задача оптимизации конструкции алюминиевой крышки на основе комплексного подхода, состоящего в последовательном использовании топологических и параметрических оптимизационных методов и выполнении на последней стадии работы снижения уровня концентрации напряжений путем оптимизации формы узлов крышки. При этом на стадии выбора конструктивно-силовой схемы крышки применяются приемы топологической оптимизации, на стадии выбора толщин и параметров силовых элементов – способы параметрической оптимизации, а на стадии конструктивно-технологического оформления узлов – методы оптимизации формы. Выполненные расчетные исследования привели к следующим основным результатам:

- к выявлению прогрессивных конструктивно-силовых схем и конструктивно-технологических решений, обеспечивающих значительное снижению массы крышек люковых закрытий при умеренных затратах на их изготовление;
- к высоким оценкам эффективности использования современных алюминиевых сплавов для изготовления люковых закрытий, способствующим существенному снижению их материалоемкости (примерно двукратному и более по сравнению с использованием стали), улучшению условий их функционирования и проведения погрузочно-разгрузочных работ на сухогрузных судах;
- к выводу об эффективности использования разработанных конструкторских решений для крышек люковых закрытий при создании перспективных сухогрузных судов.

Ключевые слова: крышка люкового закрытия, проектирование, конструкция, топологическая оптимизация

Bulk carrier aluminum hatch cover optimization

Gennady B. Kryzhevich¹, Anton R. Filatov²

¹State marine technical university of Saint-Petersburg, Russian Federation

²Krylov State Research Centre, Russian Federation

Abstract A bulk carrier hatch cover, which provides cargo compartments impermeability and cargo transportation on the cover, as well as safety of bulk carriers and sea cargo transportation in them, is studied. Cover high material consumption decreases vessel profitability, causes the necessity to use either powerful and mass-dimensional cover lifting devices (for removable hatch covers) or covers rotation and movement (for hinged covers). The purpose of this paper consists in considerable decrease of hatch cover material consumption through rational selection of covers material and design at provision of the required covers reliability level. Parametric optimization of a conventional steel cover of RSD59 project bulk carrier could result in cover mass decrease by more than 15 to 17%. Therefore, to achieve the work purpose, a problem of aluminum cover structural optimization was solved based on a comprehensive approach that consisted in successive use of topologic and parametric optimization methods and decrease of the stress concentration level at the last step via cover assemblies shape optimization. At that topological optimization methods were applied at the stage of selecting cover structural arrangement; parametric optimization methods were applied at the stage of selecting load-carrying elements thickness and parameters, and shape optimization methods were used at the stage of structural and technology design of assemblies. The performed calculation studies resulted in the following:

- revealing the advanced structural arrangements and design and technology solutions that provide considerable hatch covers mass decrease at reasonable costs for their manufacture;
- high assessment of using advanced aluminum alloys for manufacturing hatch covers that promote considerable decrease of their material consumption (approximately up to twofold or greater in comparison with steel), improving conditions of cover functioning and handling operation in bulk carriers;
- conclusion on effectiveness of using developed design solutions for hatch covers when creating prospective bulk carriers.

Key words: hatch cover, design, structure, topology optimization

Введение

Объектом исследования является конструкция крышки люкового закрытия сухогрузного судна [1, 2],

служащая для обеспечения непроницаемости грузовых помещений и перевозки на ней грузов, например, контейнеров. При больших размерах люка крышка закрытия обычно используется попарно с

другой крышкой таких же габаритов. Каждая из них опирается по трём кромкам на комингс люка, а четвёртой, свободной (не опертой) кромкой, притыкается в рабочем положении через уплотнительный контур к смежной крышке, вместе с которой они перекрывают люк. Крышка содержит настил, под которым закреплены продольные и поперечные подкрепляющие элементы, причём по контуру настила, имеющего прямоугольную форму в плане, расположены усиленные балки. Подкрепляющие настил рёбра жёсткости имеют, как правило, одинаковое поперечное сечение и расположены параллельно свободной кромке крышки через одинаковые промежутки, называемые шпацией. Подкрепляющие элементы в виде усиленных балок набора крышки располагаются как параллельно рёбрам жёсткости (рамные продольные балки), так и перпендикулярно к ним (поперечные балки). Рамные балки выполняются с такой же высотой, как и усиленные балки на контуре крышки. Перекрёстные балки по высоте значительно больше рёбер жёсткости. По отношению к высоте рамных балок перекрёстные связи бывают либо сопоставимыми с ними, либо (что наблюдается преимущественно) меньшими их. Такое конструктивное оформление характерно для современной стальной конструкции люкового закрытия сухогрузного судна проекта RSD59 компании «Морское Инженерное Бюро» (рис. 1).

Крышка люкового закрытия является конструкцией повышенной ответственности, надёжность работы которой обеспечивает безопасность сухогрузных судов и осуществляемой на них морской перевозки грузов. Успешное функционирование крышки люкового закрытия с расположенным на ней грузом обеспечивается при двух условиях: отсутствие нарушения её прочности и отсутствие предельно допустимых вертикальных перемещений её свободной кромки, превышение которых создаёт опасность нарушения герметичности люкового закрытия.

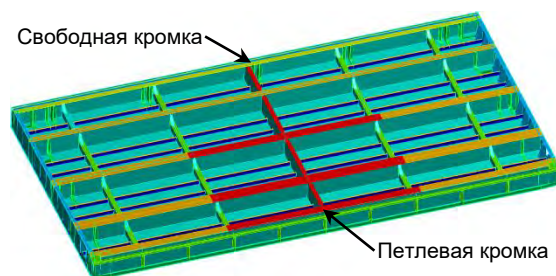


Рис. 1. Традиционная конструкция крышки люкового закрытия, судно проекта RSD59 (вид снизу).

Раскраска конструктивных элементов соответствует их толщине (минимальные значения – синий цвет, максимальные – красный)

Недостатками подобной крышки люкового закрытия являются большая материалоемкость, снижающая экономическую эффективность судна как транспортного средства, и необходимость использования мощных и массогабаритных средств подъёма крышек (для съёмных люковых закрытий), либо поворота и передвижения крышек (для шарнирно-откидных закрытий). Эти недостатки обусловлены нерациональным конструктивным оформлением крышки и неправильным выбором

соотношений между жёсткостями балок на изгиб. Поэтому целью излагаемого исследования является существенное снижение материалоемкости крышек люкового закрытия за счёт рационального выбора их материала и конструктивного оформления при одновременном обеспечении требуемого уровня его надёжности, благодаря чему достигается высокая экономическая эффективность судна.

1. Методы и алгоритм оптимизации конструкции крышки

Попытки параметрической оптимизации люкового закрытия сухогрузного судна проекта RSD59 показали, что при использовании в качестве материала крышки обычных судостроительных сталей снижение её массы не будет превышать 15-17%. Заказчик данной работы («Институт легких материалов и технологий», входящий в российскую Алюминиевую Ассоциацию) потребовал более радикального снижения материалоемкости на основе применения современных алюминиевых сплавов. Поэтому для достижения цели работы решается задача оптимизации конструкции алюминиевой крышки на основе комплексного подхода [3], состоящего в последовательном использовании топологических и параметрических оптимизационных методов и выполнении на последней стадии работы по снижению уровня концентрации напряжений путём выполнения оптимизации формы узлов крышки (рис. 2). При этом на стадии выбора конструктивно-силовой схемы крышки применяются приёмы топологической оптимизации, на стадии выбора толщин и параметров силовых элементов – способы параметрической оптимизации, а на стадии конструктивно-технологического оформления узлов – методы оптимизации формы. Реализация такого многостадийного процесса ведётся в рамках эффективного алгоритма оптимизации конструкций (рис. 2) [3].



Рис. 2. Укрупнённая блок-схема алгоритма оптимального проектирования крышки

При оптимизации крышки учитывалось, что она должна иметь, по возможности, минимальную массу. В качестве прототипа была взята крышка люкового закрытия сухогрузного судна проекта RSD59, показанная на рис. 1. Ограничениями выступают габаритные размеры крышки, а также величина максимального прогиба при действии нормативной нагрузки (согласно Правилам [9]). Оптимизируемая крышка свободно опирается по трём сторонам (одна из длинных сторон является петлевой кромкой, и две короткие стороны опираются на комингсы люка), а её четвёртая сторона является свободной.

Для решения поставленной задачи были использованы методы SIMP и LS топологической оптимизации [3]. Область проектирования показана на рис. 3б. Она представляет собой параллелепипед с габаритными размерами проектируемой крышки, которые приняты такими же, как у стального прототипа. На обшивку крышки приложено расчётное давление (рис. 3а).

Оптимальное решение ищется в объёме всего параллелепипеда, при этом плоская верхняя грань, являющаяся поверхностью наружной обшивки, воспринимающей нагрузку, а также четыре боковые грани, являющиеся сторонами крышки, оставались в процессе оптимизации неизменяемыми поверхностями. Целевой функцией являлась податливость конструкции, выполнялась её минимизация. Ограничением выступала масса конструкции (одинаковая для обоих методов). При использовании метода SIMP было введено также ограничения на максимальный прогиб конструкции и на уровень наибольших напряжений, принимаемые в соответствии с нормативными требованиями Российского морского регистра судоходства. При оптимизации крышки методом LS это оказалось невозможным, поскольку он не поддерживает ограничительных условий ни по прогибу, ни по напряжениям.

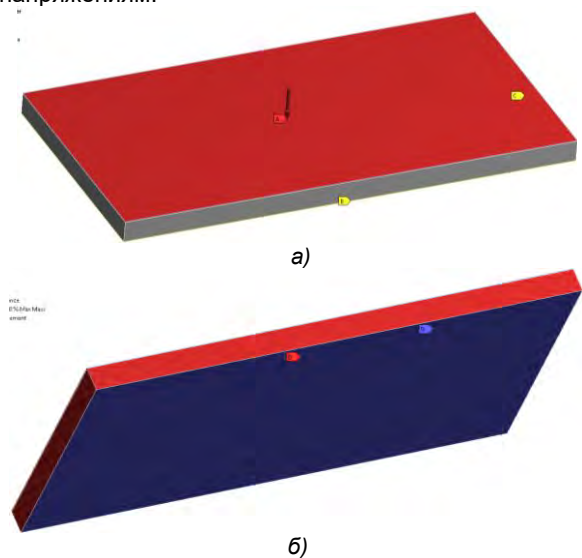


Рис. 3. Область проектирования в задаче топологической оптимизации перекрытия:
 а) равномерно распределённое давление на наружную обшивку и закрепление трёх кромок (вид сверху);
 б) область оптимизации (выделена синим цветом), являющаяся внутренностью параллелепипеда (вид снизу)

2. Результаты топологической оптимизации

Результат топологической оптимизации, выполненной методом SIMP, показан на рис. 4. Как видно, полученное решение свидетельствует о рациональности формирования ряда ферменных конструкций, тянущихся в поперечном направлении от петлевой кромки в сторону свободной кромки. Также оптимизация даёт информацию о целесообразности наличия между петлевой кромкой и короткими сторонами опорного контура диагонально ориентированных связей (раскосов), которые вместе с соединяемыми ими стенками, расположенными по сторонам опорного контура, образуют фигуры треугольной формы в плане и увеличивают жёсткость крышки. Параллельно свободной кромке и вблизи неё целесообразно создание мощной конструкции, напоминающей балку, заканчивающуюся по концам раздвоениями в виде косо расположенных материалоемких элементов (поясков), соединяющих верхнюю часть балки со стенкой, расположенной на свободной кромке, и нижнюю часть со стенками, простирающимися вдоль коротких сторон опорного контура. Элементы, соединяющие верхнюю часть балки со стенкой, расположенной на свободной кромке вблизи углов крышки, целесообразно связывать также с обшивкой крышки.

На рис. 5 показан результат топологической оптимизации, выполненной методом LS. Поскольку этот метод не поддерживает ограничения по прогибам и напряжениям, то в результате оптимизации получилось чрезмерно грубое решение. От всего многообразия элементов перекрытия осталась только одна мощная связь (напоминающая балку) около свободной кромки. Данное обстоятельство подтверждает результаты оптимизации методом SIMP и прямым образом указывает на то, что эффективное мощное подкрепление крышки, в первую очередь, должно быть установлено именно в этом месте.

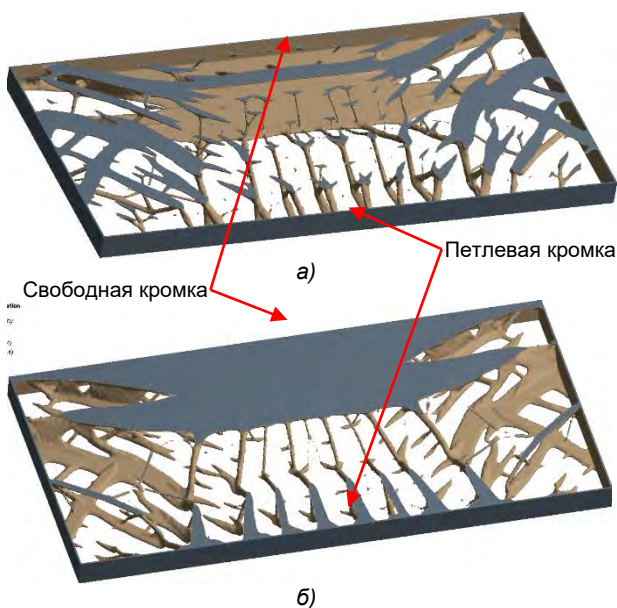


Рис. 4. Результат топологической оптимизации методом SIMP (наружная обшивка не показана): а) вид сверху; б) вид снизу. Тёмно-серым цветом показаны поверхности, принадлежащие исходной границе

области проектирования, бежевым цветом показаны поверхности, образовавшиеся в результате оптимизации

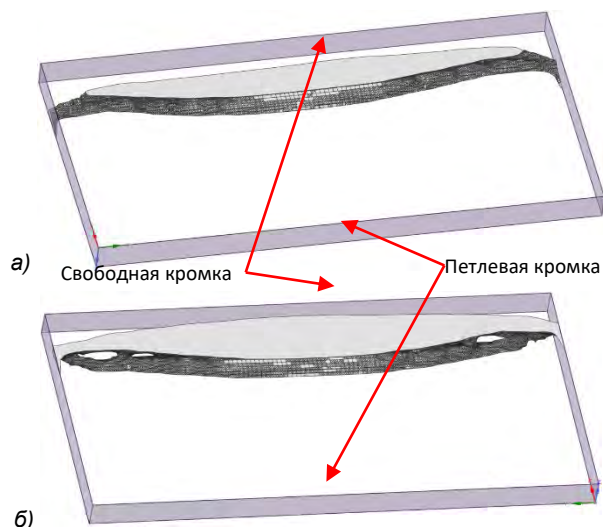


Рис. 5. Результат топологической оптимизации методом LS (наружная обшивка не показана): а) вид сверху; б) вид снизу

3. Адаптация полученных решений под традиционную технологию

Адаптация полученного решения под традиционные для судостроения технологии выполнялась путём поиска более простого (в технологическом и топологическом смыслах) конструкторского решения по сравнению с полученным при топологической оптимизации. В результате такого поиска основные топологические особенности упрощаемого (оптимального по своей топологии) и упрощённого объектов должны быть сохранены. Для достижения этого принято целесообразным придать конструкции крышки в первом варианте топологического исполнения следующий облик (рис. 6):

- выполнить ранее отмеченное эффективное подкрепление в виде очень жёсткой продольной балки с замкнутым профилем поперечного сечения, расположенной параллельно свободной кромке крышки на небольшом удалении от неё;
- формирование порядка 8 ферменных поперечных балок, перекрывающих расстояние между петлевой и свободной кромками крышки, причём две из них (расположенные от свободно опертых кромок на расстоянии порядка 40% от расстояния между петлевой и свободной кромками крышки) выполняются усиленными; при этом каждая из ферменных поперечных балок состоит из стоек 1, 4 и 10, присоединённого пояска в виде обшивки крышки 5, соединённой сваркой с балкой 8 таврового или полосульбового профиля, нижнего пояска 3 продольной балки с двумя стенками, расположенной со стороны свободной кромки крышки и уменьшающей её изгибные перемещения, на которые накладываются нормативные требования правил классификационных обществ, трубчатых раскосов 7 и 12, соединённых сваркой с балками

8 и 11, стойками и продольной балкой 6 с помощью книц;

- дополнительно установить с двух сторон крышки между усиленными поперечными балками и поперечными балками, расположенными на свободно опертых кромках крышки, две относительно короткие продольные (или ориентированных под некоторым углом к продольному направлению) связи (показанные в сечении Г-Г рис. 6), поддерживаемые трубчатыми раскосами.

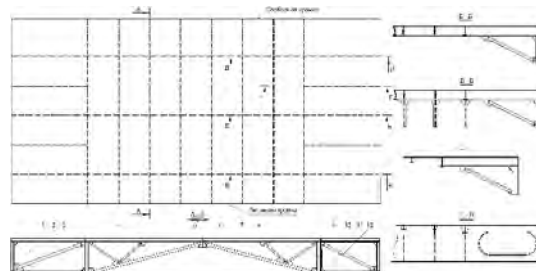


Рис. 6. Результат адаптации решения, полученного при топологической оптимизации (в левом верхнем углу чертежа показан вид крышки в плане)

Экономия веса крышки при таком исполнении обеспечивается за счёт создания конструкции, обладающей при заданных уровнях нагрузки и материалоемкости максимальной жёсткостью (или, точнее, минимальной потенциальной энергией деформации). Увеличение жёсткости и экономия материалоемкости конструкции при такой топологии достигается благодаря следующим конструктивным факторам:

- наличию усиленной продольной балки с поперечным сечением замкнутого профиля, расположенной параллельно свободной кромке крышки; такая балка имеет не только большую изгибную жёсткость, она обладает высокой жёсткостью при кручении вокруг нейтральной оси балки, благодаря которой обеспечивается близкая к жёсткой заделка поперечной ферменной балки на усиленной продольной балке (это обстоятельство приводит к существенному повышению жёсткости и прочности крышки в целом);
- изготовлению поперечных балок в ферменном исполнении, позволяющем обеспечить их повышенную жёсткость при изгибе и избежать при высоком уровне нагружения характерного для традиционной конструкции (рис. 1) значительного снижения изгибной жёсткости из-за потери устойчивости присоединённых поясков обшивки;
- наличию в ферменной балке со стороны петлевой кромки замкнутой четырёхугольной рамы, стержни которой соединены со стенками двух продольных балок (одна из которых находится на петлевой опорной кромке); благодаря такому конструктивному оформлению обеспечивается высокий уровень заделки поперечных ферменных балок на двух продольных балках;
- более рациональному использованию поддерживающего эффекта поперечных (боковых) опорных линий контуров, внешние усилия (нагрузки со стороны грузов на крышке) на которые оказалось удобнее передавать через продольные связи и трубчатые раскосы,

изображённые на сечениях Б-Б, В-В и Г-Г рис. 6. Благодаря такому использованию опорных линий контуров оказалось возможным отказаться от использования поперечных балок вблизи этих линий, которые имеют более высокую материалоемкость по сравнению с упомянутыми короткими продольными связями и трубчатыми раскосами.

Отмечая близость рассматриваемого адаптированного варианта конструктивно-силовой схемы крышки к компьютерному решению и его эффективность с точки зрения снижения материалоемкости, следует, однако, признать, что этот вариант не является единственно возможным. Представляет интерес и второе топологическое исполнение крышки, показанное на рис. 7а, которое более технологично и ближе к традиционному (рис. 1). В нём вместо поперечных ферм использованы сплошные балки поперечного набора, часть из которого выполнена в виде интеркостельных связей. Их основная роль заключается в поддержании продольной балки, расположенной вблизи петлевой кромки. Благодаря этой роли вертикальные перемещения этой балки невелики, что обеспечивает хорошую заделку поперечной балки двумя продольными (расположенными на петлевой кромке и вблизи неё), снижает материалоемкость длинных поперечных балок и прогибы свободной кромки крышки. Кроме того, полезная функция интеркостельных связей заключается в непосредственном переносе ими эксплуатационной нагрузки на опорный контур люкового закрытия. Отметим здесь, что при большом различии высот поперечных и продольных балок можно отказаться от установки интеркостельных связей, основная роль которых может быть с успехом выполнена обычными (длинными) поперечными балками, имеющими на участках между петлевой кромкой и соседней продольной балкой увеличенную высоту (рис. 8). Во втором варианте исполнения также имеется мощная продольная балка у свободной кромки крышки, причем эта балка соединена диагональными связями с продольной балкой, расположенной на свободной кромке. Также диагональные связи использованы для соединения стенок на коротких опорных кромках крышки со стенкой на петлевой кромке, что увеличивает жёсткость люкового закрытия. Второй вариант предусматривает также установку дополнительных коротких поперечных связей, соединяющих стенку на петлевой кромке со стенкой ближайшей продольной балки.

Недостатком второго варианта является наличие скученности сварных швов в местах пересечений стенок балок, ориентированных в продольном и диагональном направлениях. Поэтому этот вариант обладает относительно низкой технологичностью и возможен для изготовления крышки лишь при использовании в отмеченных местах пересечения стенок балок специальных элементов, изготавливаемых по технологиям машиностроения. Поэтому разработаны также третий (рис. 7б) и четвертый (рис. 8) варианты, отличающиеся большей простотой и меньшей трудоёмкостью изготовления по сравнению с предыдущими. Эти варианты уже не имеют диагональных связей. Отличительной особенностью третьего варианта

является наличие дополнительной продольной связи. Четвертый вариант не содержит интеркостельных связей, а продольная балка у свободной кромки имеет замкнутый контур.

Снижение материалоемкости люкового закрытия в третьем варианте исполнения достигается за счёт того, что крышка снабжена усиленными балками, параллельными рёбрам жёсткости, причём не менее чем одна из них расположена рядом с находящейся на свободной кромке крышки балкой, а еще одна – рядом с балкой, находящейся на петлевой кромке. Жёсткости этих балок на изгиб имеют тот же порядок, что и жёсткости балок, расположенных на сторонах прямоугольного контура крышки (при виде сверху). Балки перпендикулярного направления по отношению к свободной кромке имеют различные длины, а именно имеются балки, простирающиеся от одной кромки перекрытия до ей противоположной и пристыкованные к усиленным балкам, расположенным на контуре настила. Между этими балками со стороны петлевой кромки находятся короткие балки (интеркостельные связи), опирающиеся на балку контура настила и соседнюю с ней усиленную балку. Все балки перпендикулярного направления имеют жёсткости на изгиб не менее чем в 5 раз меньше по сравнению с усиленными балками, параллельными рёбрам жёсткости. Жёсткость на изгиб рёбер жёсткости не менее чем в 5 раз меньше жёсткости балок перпендикулярного направления.

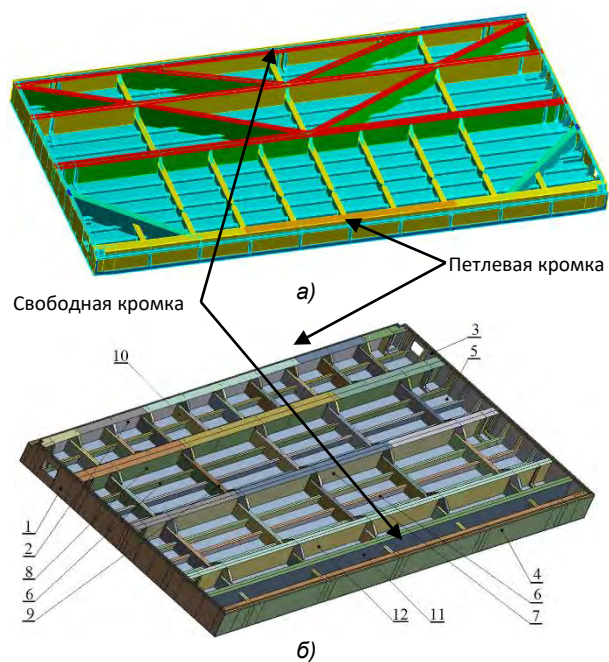


Рис. 7. Второй и третий варианты исполнения упрощённых конструкций крышки со сплошными балками (вид снизу): а) с наличием косо расположенных балок; б) с взаимно перпендикулярными балками

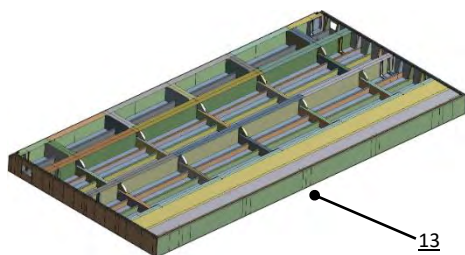


Рис. 8. Вариант упрощённой конструкции крышки без интеркостельных связей, со сплошными взаимно перпендикулярными балками и замкнутым контуром поперечного сечения продольной балки у свободной кромки (вид снизу)

Наличие интеркостельных связей и указанных соотношений между жесткостями балок обеспечивает высокий уровень равномерности распределения максимальных напряжений в элементах крышки и равнопрочности основных элементов, обеспечивающих малую материалоемкость крышки при одновременном достижении требуемого уровня надёжности.

Предлагаемая крышка люкового закрытия в третьем варианте исполнения содержит балки 1-3, расположенные на опорном контуре крышки, балку 4, расположенную на свободной кромке, обшивку 5 с имеющимися на ней рёбрами жёсткости 6, усиленную рамную балку 7, расположенную относительно далеко от других рамных балок, усиленную рамную балку 8, расположенную рядом с балкой опорного контура, балки перекрёстного направления 8 с расположенными между ними интеркостельными связями 10, две усиленные рамные балки 11 и 12, находящиеся близко от балки, расположенной на свободной кромке крышки.

В четвёртом варианте исполнения крышка люкового закрытия содержит широкую полосу 13, служащую свободным пояском для трёх соседних усиленных балок, расположенных со стороны свободной кромки крышки. Наименьшая материалоемкость крышки достигается при установке семи-восьми поперечных балок.

В третьем и четвёртом вариантах исполнения крышка люкового закрытия может содержать прессованные панели, образующие настил вместе с рёбрами жёсткости.

При действии сил веса груза, перевозимого на крышке с третьим вариантом исполнения, происходит изгиб перекрытия, образованного усиленными рамными балками, поперечными балками и рёбрами жёсткости. При таком изгибе наличие не менее двух балок, близко расположенных рядом со свободной кромкой крышки, эффективно препятствует развитию больших прогибов перекрытия в этом районе и способствует эффективной поддержке менее жёстких перекрестных связей и их жёсткому заземлению со стороны свободной кромки крышки, благодаря чему в них не развиваются большие внутренние усилия. Снижение этих усилий способствует обеспечению прочности и снижению веса поперечных балок. Кроме того, изгибу перекрытия препятствует наличие интеркостельных связей, передающих часть веса груза непосредственно на балку контура, к которой эти связи прикреплены. Помимо этого, интеркостельные связи препятствуют изгибу

усиленной рамной балки 8, благодаря чему эта балка совместно с балкой 2, расположенной на опорном контуре, создают жёсткое защемление перекрёстных балок со стороны опертой кромки крышки, снижая в них напряжения от изгиба. Создаваемое таким образом снижение деформаций элементов перекрытия при действии эксплуатационных нагрузок даёт возможность снижения веса крышки примерно в два раза.

В вариантах исполнения с использованием прессованных панелей, образующих настил вместе с рёбрами жёсткости, обеспечивается малое расстояние между этими рёбрами, благодаря чему создаются благоприятные условия для обеспечения устойчивости пластин настила, испытывающих сжатие при изгибе крышки под действием эксплуатационных нагрузок. В таких условиях по условиям прочности и устойчивости возможно уменьшение толщины настила, эффективно снижающее материалоемкость крышки люкового закрытия.

Таким образом, предлагаемые варианты конструктивно-силового исполнения крышки люкового закрытия обеспечивают снижение уровня напряжённости её элементов при изгибе под действием эксплуатационных нагрузок и позволяют снизить материалоемкость люковых закрытий в целом, а также повысить экономическую эффективность судна, что выгодно отличает крышки с предлагаемыми конструктивными решениями от исходного стального варианта. Кроме того, использование лёгких сплавов с более высокими показателями удельной прочности по сравнению со сталью, приводят к более существенному снижению массы алюминиевой конструкции. Применение алюминиевых сплавов эффективно для снижения массы конструкций ещё и вследствие получения более значительных толщин основных связей конструкции, облегчающих обеспечение устойчивости пластин обшивки и других элементов крышки.

4. Результаты комплексного применения методов оптимизации и рекомендации по конструированию крышки люкового закрытия

Выбранные на основе топологической оптимизации варианты конструктивно-силовых схем крышки, показанных на рис. 6 и 7, переработаны в окончательные конструкторские решения за счёт рационального выбора толщин и параметров силовых элементов крышки, осуществлённого с использованием метода параметрической оптимизации, а также благодаря принятию решений по конструктивно-технологическому оформлению узлов на основе метода оптимизации формы. В итоге такой работы оказалось возможной оценка эффективности каждого из полученных вариантов топологии крышки.

Вариант топологического оформления конструкции крышки, показанный на рис. 6, весьма эффективен, поскольку при его использовании масса алюминиевой крышки составляет 48% от массы исходной стальной при использовании сплава марки 1561М и 46% – при применении скандий-содержащего сплава марки Р-1580М. Масса крышки при втором варианте исполнения (в сравнении со стальной крышкой) составляет всего 53% (при

сплаве 1561М) и 51% (при сплаве Р-1580М). Более технологичные варианты исполнения крышки, представленные на рис. 7б и 8, имеют и более высокие показатели материалоемкости. При третьем варианте оформления крышки её масса составляет 57% от массы исходного варианта при использовании сплава 1561М и 55% – при применении сплава Р-1580М. Четвёртый вариант крышки даёт значения массы, составляющие 55% от массы стального варианта при использовании сплава 1561М и 53% – при применении сплава Р-1580М.

Сравнение относительных стоимостей изготовления конструкций, вычисленных по методикам работ [10, 11], приведено в табл. 1.

Таблица 1
Сравнение материалоемкости и стоимости изготовления вариантов конструкции

№ вар.	Марка сплава	Относительная материалоемкость (в долях от массы исходной конструкции)	Относительная стоимость изготовления (в долях от стоимости исходной конструкции)
1	1561М	0,48	0,64
	Р-1580М	0,46	1,22
2	1561М	0,53	0,71
	Р-1580М	0,51	1,35
3	1561М	0,57	0,76
	Р-1580М	0,55	1,46
4	1561М	0,55	0,73
	Р-1580М	0,53	1,41

Литература

1. Александров М.Н. Судовые устройства. Справочник. Л.: Судостроение, 1987. 656 с.
2. А.С. 1088986 СССР, МПК В 63 В 19/14. Люковое закрытие судового отсека / Мещеряков А.Г. (СССР). – 2962007/27-11; заявлено 18.07.1980; опубл. 30.04.1984.
3. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020, 1(391): С. – .
4. D.J. Munk, G.A. Vio, G.P. Steven Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2015, vol. 52, no. 3: 613–631.
5. X. Huang, Y.M. Xie Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials. Computational Mechanics. 2009, no. 43: 393–401.
6. J.D. Deaton, R.V. Grandhi A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2014, vol. 49, no. 1: 1–38.
7. E. Tyflopoulos, D.T. Flem, M. Steinert, A. Olsen State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. Proceedings of Nord Design, Linköping, 2018.
8. H. Xu, L. Guan, X. Chen, L. Wang Guide-weight method for topology optimization of continuum structures including body forces. Finite Elements in Analysis and Design. 2013, vol. 75: 38–49.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Часть III. Устройства, оборудование и снабжение. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019.
10. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н. Техничко-экономические основы проектирования строительных конструкций: Учебное пособие. Киев-Донецк: Вища школа, 1980. 240 с.
11. Кокин М.В. Техничко-экономическая оценка вариационных решений металлических конструкций. М.: МИИТ, 1988. 16 с.

References

1. Aleksandrov M.N. Sudovyye ustroystva. Spravochnik [Hull fittings. Reference book]. L.: Sudostroyeniye, 1987, 656 s (in Russian).
2. Meshcheryakov A.G. Lyukovoye zakrytiye sudovogo otseka [Ship compartment hatch cover]. Patent SU 1088986, 1980 (in Russian).
3. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020, 1(391): – (in Russian).
4. D.J. Munk, G.A. Vio, G.P. Steven Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. Structural and Multidisciplinary Optimization (2015) vol. 52, no. 3: 613–631.

После сравнения массовых и стоимостных показателей вариантов конструкции можно заключить, что из рассмотренных вариантов конструкции крышки наибольший практический интерес по совокупности своих свойств могут представлять собой первый (с наименьшей материалоемкостью) и четвёртый (с наименьшей трудоёмкостью изготовления).

Основные выводы

Результаты выполненной работы позволяют сделать следующие выводы:

- комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации крышки люкового закрытия и применение оптимизации формы для снижения концентрации напряжений в её узлах приводят к выявлению прогрессивных конструкторских решений и большому снижению массы судовых конструкций;
- использование современных алюминиевых сплавов для изготовления люковых закрытий способствует снижению их материалоемкости и улучшению условий их использования при проведении погрузочно-разгрузочных работ на сухогрузных судах;
- полученные эффективные конструктивные решения для крышек люковых закрытий могут быть с успехом использованы при создании перспективных сухогрузных судов.

5. X. Huang, Y.M. Xie Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials. *Computational Mechanics* (2009) no. 43: 393–401.
6. J.D. Deaton, R.V. Grandhi A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization* (2014) vol. 49, no. 1: 1–38.
7. E. Tyflopoulos, D.T. Flem, M. Steinert, A. Olsen State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. *Proceedings of Nord Design* (2018), Linköping.
8. H. Xu, L. Guan, X. Chen, L. Wang Guide-weight method for topology optimization of continuum structures including body forces. *Finite Elements in Analysis and Design* (2013) vol. 75: 38–49.
9. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part III Equipment, Arrangements and Outfit. Saint Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2019.
10. Likhtarnikov Ya.M., Letnikov N.S., Levchenko V.N. Tekhniko-ekonomicheskkiye osnovy proyektirovaniya stroitelnykh konstruksiy [Technical and economic basis for the building structures design]. Kiyev-Donetsk: Vishcha shkola, 1980. 240 s (in Russian).
11. Kokin M.V. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka variatsionnykh resheniy metallicheskih konstruksiy [Technical and economic evaluation of metal structures variational solutions]. M.: MIIT, 1988. 16 s (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Брониславович Крыжевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Антон Романович Филатов, аспирант, научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: st024540@student.spbu.ru

Gennadiy B. Kryzhevich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotmaskaya, 3, St. Petersburg, 1960121, Russian Federation, e-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru

Anton R. Filatov, postgraduate, researcher, Krylov State Research Centre, 44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation, e-mail: st024540@student.spbu.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.039
УДК 532.3

Исследование взаимодействия ледовых полей с неподвижной преградой

В.К. Гончаров¹, В.А. Пяткин¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье изложены результаты исследования механизмов взаимодействия дрейфующих ледовых полей с неподвижной преградой, моделирующей опору или корпус (основание) стационарной ледостойкой платформы.

Задача решалась в статической постановке, то есть рассматривалось воздействие на преграду неподвижного ледового поля, на которое, в свою очередь, воздействуют ветер и течения, свойственные шельфовым акваториям Арктических морей. Воздействие ветра и течений на ледовое поле параметризуется трением воздушного потока и водной массы о верхнюю и нижнюю поверхности ледового поля. Для оценки сил трения используются методы теории корабля, разработанные для расчета сопротивления воды движению судов. В работе построены аналитические зависимости для оценки давления ледовых полей на преграду и оценены условия разрушения льда при сжатии в зависимости от размеров ледового поля, скорости ветра, глубины акватории и высоты прилива. Результаты исследования могут быть использованы при поиске технических решений для снижения объемов нагромождения льда у стационарных ледостойких платформ.

Ключевые слова: лёд, поле, преграда, нагромождение, ветер, течение, прилив, прочность, сжатие, разрушение.

Study of the ice fields interaction with fixed barrier

Vadim K. Goncharov¹, Vasily A. Pyatkin¹

¹State marine technical university of Saint-Petersburg

Abstract. Paper presents results of the drifting ice fields interaction with stationary barrier investigations that models a leg or hull of a stationary ice-resistant platform.

Problem was solved in static setting that is consideration the unmovable ice field impact on the barrier under action the winds and currents that are typical for the Arctic shelf water areas. The impacts of wind and currents on the ice field were parameterized by the friction of the air flow and the water current on the upper or lower surface of the ice field accordingly. To evaluate the wind and current friction forces known methods of the naval architecture developed for the water resistance of ship's hull computing were applied. The analytical dependencies for evaluation of the ice field's pressure on the fixed barrier were developed that were the basement to estimate the conditions for the ice field compression fracture in dependence on the ice field sizes, wind speed, depth of water area and tidal height. Obtained outcomes can be applied for development technical solutions to reduce the volume of ice pile-up at stationary ice-resistant platforms.

Key words: ice, field, barrier, pile-up, wind, current, tidal, strength, compression, fracture.

Введение

Процессы взаимодействия льда с береговыми сооружениями изучались многими исследователями в различных аспектах этого явления, среди которых особое внимание привлекала проблема нагромождения льда на сооружения, расположенные на побережье замерзающих морей. Методы ее практического решения в настоящее время регламентируются Строительными нормами и правилами [1].

Анализ теоретических исследований этого явления, приведенный в [2], показал, что определяющими факторами для разлома льда при надвигании дрейфом на берег являются наклон берегового пляжа и глубина моря, а также скорость и направления ветра и течения. В работе использован энергетический подход, где учитывается энергия надвигающегося льда и его торошения, потенциальная энергия нагромождения и работа по преодолению сил трения льда о грунт для того, чтобы в квазистатическом приближении оценить условия разрушения льдины под действием изгиба, определить размеры обломков и высоту их подъема на берег. Достаточно проблематичным в этом подходе при его практическом применении является определение касательных напряжений от ветра и

течения на поверхности льда, которые вызывают его дрейф, и последующее надвижение льда на берег.

В основе исследований навала льда на наклонную стенку шельфового сооружения [3] лежит решение задачи об изгибе ледяной пластины плавучестью скопившихся под ней обломков льда. Полученное решение позволяет оценить размеры подводной части навала, зависимость его от прочности льда на изгиб и его толщины, а также найти ситуацию, когда подводная часть навала достигает дна акватории. Использованный подход проверялся экспериментально [4].

Основой данного исследования является оценка усилий, действующих на ледовое поле со стороны ветра и течений. Для этого использован подход, развитый в Теории корабля для расчета ходкости судов, а именно для оценки сопротивления трения воды на корпусе [7]. Сопротивление трения оценивается по смоченной поверхности эквивалентной по площади корпусу судна плоской пластине для коэффициента турбулентного трения при числе Рейнольдса Re , соответствующему длине корпуса и скорости движения судна.

Этот подход, адекватность которого проверена ходовыми испытаниями судов, применяется для оценки силового воздействия на ледовое поле ветра, дрейфового и приливного течения в зависимости от скорости ветра, высоты прилива, глубины акватории

и размеров ледового поля. Соответственно, возникающей от ветра и течений силой ледовое поле воздействует на преграду, и величина напряжения сжатия в зоне контакта поля с преградой определяет условие разрушения льда сжатием, а также объем разрушенного льда, который формирует нагромождения льда перед стенкой. Этот же подход позволяет решить другие задачи, в частности, сформулировать условия прорезания дрейфующего ледового поля одиночной опорой.

Процессы взаимодействия морского льда с сооружениями имеют чрезвычайно сложный характер вследствие неоднородности его физико-механических свойств по поперечному сечению и зависимости свойств от формы кристаллической структуры, а также от температуры и солёности. В данном исследовании эти эффекты не рассматриваются, так как основной задачей является адекватная глобальным процессам схематизация воздействия и разрушения дрейфующего льда на преградах с целью поиска эффективных путей борьбы с нагромождениями льда у стационарных ледостойких платформ.

1. Нагрузки от ветра и течений на ледовое поле

1.1 Воздействие ветра на ледовое поле

Представим ледовое поле в виде плоской пластины, имеющей равную площадь S и характерный размер L , соответствующий наибольшему размеру ледового поля в направлении ветра. (Рис. 1). Сила трения ветра – воздушного потока, действующая на ледовое поле, определяется для этой эквивалентной пластины [7].

Предполагаем, что ветер направлен вдоль продольной оси пластины, и скорость его постоянна. Коэффициент турбулентного трения ветра на плоской пластине определяется следующим образом [8]:

$$\zeta_{fr w} = \frac{0.455}{(\log(Re_w))^{2.58}} \quad (1)$$

В этой формуле входит число Re_w , которое зависит от продольного размера эквивалентной пластины L , скорости ветра W и v_a - кинематической вязкости воздуха.

Сила воздействия ветра F_w на пластину (ледовое поле), определяется следующей формулой:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a \zeta_{fr w} W^2 L B \quad (2)$$

Здесь ρ_a – массовая плотность воздуха, B – ширина эквивалентной пластины.

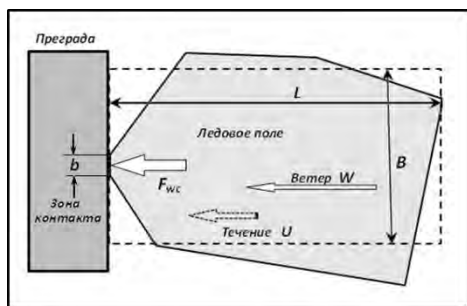


Рис. 1. Схема задачи о взаимодействии ледового поля с неподвижной преградой под влиянием ветра и течений

Подставляя (1) в формулу (2) получаем выражение для силы ветра, действующей на пластину:

$$F_w(W, L) = 0.2275 \rho_a \left[\log \left(\frac{WL}{v_a} \right) \right]^{-2.58} W^2 L B \quad (3)$$

Этот результат показывает, что воздействие ветра на ледовое поле определяется в первую очередь скоростью ветра и размерами ледового поля.

1.2 Воздействие течений на ледовое поле

В мелководных Арктических морях основными с точки зрения воздействия на ледовые поля являются дрейфовое (ветровое) и приливное течение. Для решения задачи примем следующее основное допущение: скорость течения направлена вдоль продольной оси ледового поля. Отклонения от этого условия, связанные с наличием перед полем преграды, локализируются на малом сравнительно с длиной поля участке и пренебрежимо малы в сравнении с суммарным воздействием течений и ветра. Для оценки воздействия течения на ледовое поле применяется тот же подход, что и для ветра.

Рассмотрим эффекты, связанные с дрейфовым течением. Предполагаем, что сплоченность льда в рассматриваемой акватории относительно не велика, то есть не препятствует развитию дрейфового течения. Скорость поверхностного дрейфового течения U_{cw} оценивается по следующей формуле [9]:

$$U_{cw} = \frac{1.27 \times 10^{-2} W}{\sqrt{\sin \varphi}} \quad (4)$$

В этой формуле φ - географическая широта места (для $\varphi > 10^\circ$ и $W > 6$ м/с). Вектор скорости дрейфового течения на поверхности моря в северном полушарии отклоняется от направления ветра вправо на угол θ , зависящий от глубины. Воздействие дрейфового течения на ледовое поле определим его проекцией на направление ветра. Коэффициент турбулентного трения дрейфового течения на плоской пластине рассчитывается аналогично (1), с учетом того, число Re_{uc} зависит от величины проекции скорости течения на направление ветра и v_w - кинематической вязкости воды, то есть:

$$Re_{uc} = \frac{U_{cw} \cos \theta L}{v_w} = \frac{1.27 \times 10^{-2} W L \cos \theta}{v_w \sqrt{\sin \varphi}} \quad (5)$$

Сила воздействия дрейфового течения на ледовое поле определяется формулой, аналогичной (3). После преобразований получаем:

$$F_w(W, L) = 3.669 \times 10^{-5} \frac{\rho_w \cos^2 \theta}{\sin \varphi} \times \left[\log \left(\frac{1.27 \times 10^{-2} W L \cos \theta}{v_w \sqrt{\sin \varphi}} \right) \right]^{-2.58} W^2 L B \quad (6)$$

Сравнение сил, действующих на ледовое поле со стороны ветра и течения, по формулам (3) и (6) показало, что воздействие дрейфового течения не превышает 11% ветрового. Поэтому эффекты дрейфового течения можно не принимать во внимание при оценке ледовых нагрузок.

Скорость приливного течения меняется по величине и направлению на протяжении цикла: прилив – отлив. Наибольшей величины скорость

приливного течения достигает в момент времени, когда высота прилива h_{td} достигает половины максимальной его величины. Скорость течения в этот момент U_{td} можно оценить по следующей формуле [9]:

$$U_{td} = \frac{h_{td}}{2} \sqrt{\frac{g}{H}} \quad (7)$$

В этой формуле g – ускорение силы тяжести. (Предполагается, что высота прилива существенно меньше глубины акватории H). Сила воздействия приливного течения на ледовое поле определяется следующей формулой:

$$F_{ut}(h_{td}, H, L) = 5.69 \times 10^{-2} \frac{g \rho_w h_{td}^2}{H} \cdot \left[\log \left(\frac{h_{td} \sqrt{gL}}{2 v_w \sqrt{H}} \right) \right]^{-2.58} LB \quad (8)$$

Воздействие приливного течения на ледовое поле помимо его размеров зависит от высоты прилива и глубины акватории: воздействие возрастает с увеличением высоты прилива и уменьшением глубины.

2. Воздействие ледового поля на плоскую преграду

Соотношение размеров ледового поля и преграды могут быть различными, и ледовое поле может примыкать к преграде различно в отношении площади контакта. Площадь контакта S_c зависит, в свою очередь, от протяженности зоны контакта b_c и толщины ледового поля h_{ice} .

$$S_c = h_{ice} b_c \quad (9)$$

Представляющим практический интерес результатом контакта ледового поля с преградой является его разрушение под действием сжимающих напряжений. Предел прочности морского льда на сжатие σ_c зависит от многих факторов, включая температуру, соленость и кристаллическую структуру, а также от направления приложения нагрузки по отношению к кристаллам. В данном исследовании эти эффекты не рассматривались, и использовалось некоторое характерное значение σ_{cr} . В этом случае усилие, которое вызовет разрушение ледового поля в зоне контакта, определяется следующим образом:

$$P_{br} = \sigma_{cr} S_c = \sigma_{cr} h_{ice} b_c \quad (10)$$

Сила, с которой ледовое поле действует на преграду, представим в виде суммы двух основных составляющих, связанных с воздействием (трением) ветра и приливного течения:

$$F_s(W, L, B, h_{td}, H) = F_w(W, L, B) + F_{ut}(L, B, h_{td}, H) \quad (11)$$

Приравнявая (10) и (11) можно найти ширину зоны контакта b_{cr} ледового поля с преградой, когда при определенных гидрометеорологических условиях (W, h_t) в акватории глубиной H напряжение сжатия в зоне контакта превысит прочность льда на сжатие σ_{cr} , и произойдет разрушение ледового поля. Это условие параметризуется выражением:

$$b \leq \frac{F(W, L, B, h, H)}{\sigma h} \quad (12)$$

Для преграды большой протяженности разрушение ледового поля произойдет, когда

ледовое поле касается о препятствия одним из своих углов, как это показано на Рис. 1.

При достаточно большом давлении ледового поля угловая часть ледового поля начнет разрушаться в соответствии с условием (12) до тех пор, пока давление в области контакта не снизится до прочности льда на сжатие σ_{cr} . При этом разрушившаяся часть ледового поля образует нагромождение, часть которого окажется на поверхности льда, а другая под ним. Указанную «равновесную» ширину зоны контакта ледового поля с преградой определяется формулой:

$$b_{cr} = 0.2275 \frac{\rho_a S}{\sigma_{cr} h_{ice}} \left\{ \left[\log \left(\frac{WL}{v_a} \right) \right]^{-2.58} W^2 + \frac{g \rho_w h_{td}^2}{4 \rho_a H} \left[\log \left(\frac{h_{td} \sqrt{gL}}{2 v_w \sqrt{H}} \right) \right]^{-2.58} \right\} \quad (13)$$

Это решение можно использовать для оценки размеров нагромождения осколков льда перед преградой, объем которых соответствует объему разрушившейся части ледового поля.

3. Оценка объема и высоты нагромождения обломков льда

Объем обломков льда, которые образуются при «уловом» контакте ледового поля с преградой, можно оценить, исходя из геометрических характеристик разрушившейся части ледового поля, как это представлено на Рис. 2.

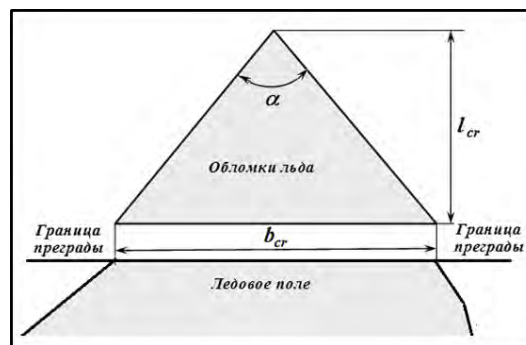


Рис.2 Схема разрушения ледового поля при «уловом» контакте с преградой.

Реальная величина угла между гранями ледового поля α может быть в диапазоне от 30° до 150° . Предполагаем, что форма разрушающегося угла ледового поля может быть представлена прямолинейным равнобедренным треугольником. Тогда площадь треугольника (вид сверху) разрушившегося на обломки льда и, соответственно, объем нагромождения льда можно представить следующим образом:

$$S_{cr} = \frac{1}{2} b_{cr} l_{cr} = \frac{1}{4} b_{cr}^2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (14)$$

$$Q_{ic} = \frac{1}{4} h_{ice} b_{cr}^2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (15)$$

Наиболее вероятно, что при разрушении рассматриваемой части ледового поля некоторая часть $\delta < 0.5$ обломков льда окажется на верхней поверхности поля и сформирует груды в виде призмы

длиной b_{cr} , поперечное сечение которой представит собой равнобедренный прямоугольный треугольник, примыкающий катетом к вертикальной стенке преграды. (Это допущение основано на том, что угол склона груды крупных обломков горных пород составляет 40 - 45° [11]). Обломки льда заполняют образовавшуюся груды не монолитно, но с некоторым коэффициентом заполнения $\omega < 1$. При таких допущениях высота нагромождения может быть оценена по следующей формуле:

$$h_{ip} = \sqrt{\frac{h_{ice} b_{cr} \delta \text{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2\omega}} \quad (16)$$

4. Моделирование воздействия ветра и течений на ледовое поле

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 1. На первом этапе оценивалось воздействие ветра на одиночное ледовое поле. Ветровая нагрузка рассчитывалась на 1 м в поперечном к направлению ветра направлении.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

N/N	Параметр	Значение
1.	длина ледового поля, L	0 – 100, км
2.	скорость ветра, W	10 – 30, м/с
3.	температуру воздуха, T _a	-20°C
4.	массовая плотность воздуха, ρ _a	0.1422 кг с ² м ⁻⁴
5.	массовая плотность воды, ρ _w	104.8 кг с ² м ⁻⁴
6.	кинематическая вязкость воздуха, ν _a	1.17·10 ⁻⁵ м ² /с
7.	кинематическая вязкость воды, ν _w	1.826·10 ⁻⁶ м ² /с
8.	широта места, φ	68°с.ш.
9.	высота прилива, h _{td}	1.5 м
10.	Глубина акватории, H	3 – 50 м

Результаты расчетов, представленные на Рис. 3, показывают, что сила воздействия ветра возрастает практически линейно с увеличением длины ледового поля. Для максимальной скорости ветра (30 м/с) на льдине длиной 1000 м эта сила равна 90 кг/м и при ширине ледового поля 100 м достигает, соответственно, 9 тонн.

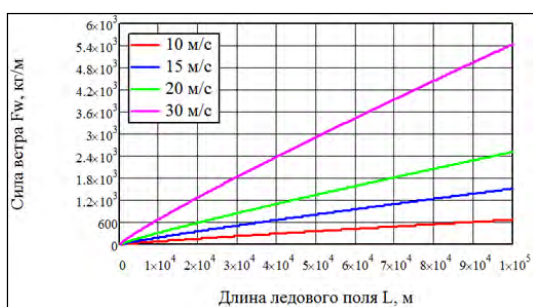


Рис. 3 Зависимость силы воздействия ветра на ледовое поле от скорости ветра и длины ледового поля

Зависимость силы воздействия на ледовое поле, вызываемое приливным течением, от длины ледового поля и от глубины акватории показана на Рис. 4. Эти материалы показывают, что на величину силы воздействия на ледовое поле от приливного течения существенно влияет глубина акватории, от которой зависит скорость течения при одинаковой высоте прилива. Это позволяет сделать вывод: что на процесс образования нагромождения обломков льда и на его объем влияет не только величина высоты прилива, но и глубина акватории, что особенно актуально для мелководных акваторий. Это так же отражается и на сравнение величин нагрузок от ветра и приливного течения. В акваториях с большими глубинами (более 8 метров) нагрузки от ветра будут больше примерно в 1.5 раза при скорости ветра 15 м/с.

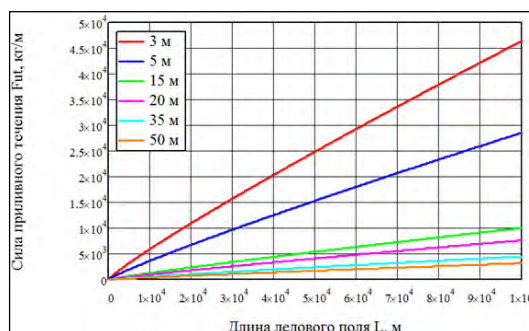


Рис. 4 Зависимость силы приливного течения от длины льдины, при высоте прилива 3,5 м и глубин акватории 3, 5, 15, 20, 35 и 50 м

5. Моделирование нагромождения обломков льда при разрушении ледового поля на стационарной преграде

Моделирование этого процесса сводится к расчету объемов нагромождения осколков льда и поиск зависимости этой величины от толщины льда и размеров ледового поля, от скорости ветра, высоты прилива и глубины акватории.

На Рис. 5 и 6 представлены зависимости объема нагромождения обломков льда от толщины ледового поля площадью 10 км² с характерной длиной 5 км, при скорости ветра 15 м/с, для различных углов заострения ледового поля в зоне контакта с препятствием.

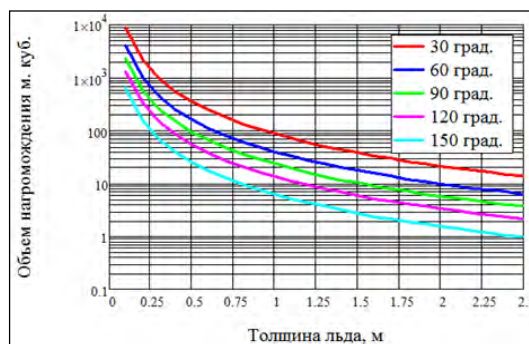


Рис. 5 Зависимость объема обломков льда от толщины ледового поля для акватории глубины 20

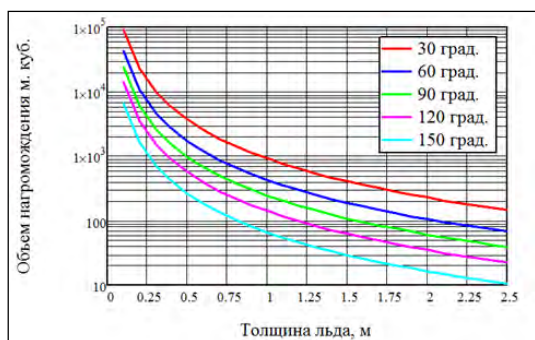


Рис. 6 зависимости объема обломков льда от толщины ледового поля для акватории 5 м.

Результаты моделирования показывают: чем острее угол между гранями ледового поля в зоне контакта, тем образуется больший объем нагромождения. Также можно заметить, что для льда с толщиной более 0.75 м угол заострения граней не оказывает сильного влияния на объем нагромождения.

При одних и тех же размерах ледового поля, и подобных метеорологических условиях, в акватории с глубиной 5 метров объем нагромождения на

порядок больше чем в акватории с глубиной 20 метров.

Заключение

В результате выполненного исследования построены математические модели и оценено воздействие ветра и течений на ледовое поле, находящееся в контакте с неподвижным препятствием. Основной вклад в суммарное усилие, возникающее на ледовом поле, вносят ветер и приливное течение. Величина усилия на ледовом поле увеличивается с ростом скорости ветра, высоты прилива и длины ледового поля, а также при уменьшении глубины акватории.

Определены условия разрушения ледового поля при контакте с неподвижным препятствием, в основу чего положено сопоставление прочности льда на сжатие с давлением ледового поля в зоне контакта, возникающего из-за воздействия ветра и течений. Результаты исследований предоставляют информацию, необходимую для лучшего понимания процессов взаимодействия ледовых полей с преградами и для количественной оценки возникающих эффектов.

Литература

1. СП 32-103-97. Проектирование морских берегозащитных сооружений. М.: Корпорация «Трансстрой», 1998. 170 стр.
2. Зубакин Г.К. Ледяные образования морей западной Арктики. Ред. Спб.: ААНИИ, 2006. 272 стр.
3. Алексеев Ю.Н., Карулина М.М. Оценка габаритов ледового нагромождения перед морскими сооружениями. Материалы 15-й Международной конференции портовых и морских инженерных технологий в ледовых условиях, РОАС'99. Эспоо, Финляндия, 1999, стр. 396 – 405.
4. Карулин Е.Б., Карулина М.М., Благовидов Л.Б. Ледовые испытания модели кессонной платформы на мелководье. Журнал Морские и Арктические технологии. Часть. 17, № 4, 2007, стр. 270 – 275.
5. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82. М.: ООО «Аналитик», 2012. 116 стр.
6. Джордан И. Механика взаимодействия льда и сооружений. Инженерная механика разрушения. Часть. 68 2001. стр. 1923 – 1960.
7. Войткунский Я.И. Сопrotивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1988. 145 стр.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва. Наука. 1974. 713 стр.
9. Гончаров В.К. Внешние нагрузки на сооружения на морском шельфе. Учебное пособие. Издательский центр СПбГМТУ. 2010. 184 стр.
10. Добровольский, А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. Издательство Московского университета. 1982.

References

1. Regulations СП 32-103-97. Design of marine shore protection structures. Moscow. Corporation «Transstroy», 1998. pp. 170
2. Zubakin G.K. Ice formations of the Western Arctic Seas. St. Petersburg. AARI, 2006. pp. 272
3. Alexeev Ju.N. , Karulina M.M. An assessment of pile-up dimension in front of offshore structures. Proceedings of the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under arctic Conditions POAC'99. Espoo, Finland, 1999. pp. 396 – 405.
4. Karulin E.B., Karulina M.M., Blagovidov L.B. Ice model tests of caisson platform in shallow water. Journal of Offshore and Polar Engineering. Vol. 17, No 4, December 2007, pp. 270 – 275
5. Regulations СП 38.13330.2012. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). Moscow. ООО «Analitik», 2012. pp. 116
6. Jordan I.J. Mechanics of ice-structure interaction. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 68. Issues 17 – 18. 2001. pp. 1923 – 1960.
7. Voitkunsii Ja.I. Resistance to water movement of ships. Leningrad. Edition "Shipbuilding", 1988. pp. 145
8. Shlihting G. Theory of the boundary layer. Moscow. Edition "Science". 1974. pp. 713
9. Goncharov V.K. External loads on offshore structures. Tutorial. Publishing center SPbMTU, 2010. pp. 184
10. Dobrovolsky, A.D., Zalugin B. S. Seas of USSR. Moscow University Press, 1982.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вадим Константинович Гончаров, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры океанотехники и морских технологий Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: vkgonch@mail.ru

Василий Анатольевич Пяткин, инженер 2 категории, аспирант, ассистент кафедры океанотехники и морских технологий Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: vasincom@yandex.ru

Vadim K. Goncharov, Ph.D. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: vkgonch@mail.ru

Vasily A. Pyatkin, graduate student, 2nd category engineer, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, e-mail: vasincom@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.041
УДК 629.5.01.017.1

О подходах к созданию системы автоматизированного мониторинга остойчивости судна

А.Н. Суслов¹, О.В. Одегова¹, Сунь Тяньши¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе предлагаются подходы к созданию системы автоматизированного мониторинга остойчивости судна, что является актуальным в связи с существующей вероятностью «опрокидывания» неаварийного судна на волнении при эксплуатации рыболовных судов, судов вспомогательного флота, а также судов, осуществляющих различные грузоподъемные операции. Существующие подходы по оценке остойчивости неповрежденного судна ориентированы на использование ряда приближенных зависимостей. В результате величины метацентрических высот оказываются намного выше действительных, особенно на слабом волнении. По мнению авторов в основе системы оперативной оценки остойчивости судна должны выступать величины, на которые можно реально опереться при анализе текущего состояния судна, а именно параметры остойчивости судна, измеряемые в режиме реального времени непосредственно в процессе навигации. На основании данных, получаемых от предлагаемой авторами системы, в режиме неаварийной эксплуатации судоводитель, получив предупреждение, может изменить параметры движения судна (или подъема груза) на безопасные. В случае аварийной ситуации (затопление отсеков) оповещение от системы позволит предупредить судоводителя о необходимости пассажирам и экипажу срочно покинуть аварийное судно. Предлагаемые в данной статье подходы определяют новые направления научных исследований в теории корабля, проектировании и эксплуатации судов.

Ключевые слова: остойчивость, авария, мониторинг, метацентрическая высота, диаграмма статической остойчивости, крен, автоматизированная система

Approaches for the stability automation monitoring creation

Alexander N. Suslov¹, Olga V. Odegova¹, Sun Tanshi¹

¹St.Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article describes new approaches for stability automation monitoring system creation. This theme is actual in a view of the capsize probability for several types of vessels during the exploitation in a real sea waves condition. Such condition is very habitual for fishing vessels as well as for auxiliary fleet vessels and also it can take place during the vessel balanced hoisting. Now all methods to solve the question of dynamic stability are based on approximate calculations which gives the metacentric height value higher than it might be in real. Article authors are of opinion, that it is necessary to use the real current figures which will be the foundation of current vessel condition calculations made during the exploitation in a real time. Based on information which could be received from the vessels automation system described by authors, the crew could get a warning if intact stability conditions are close to limits. It gives a possibility to change parameters of the current situation of the vessel to avoid any risk of the capsizing. Authors approaches define the new direction for research investigation in a theory of the vessel design and safety exploitation.

Key words: intact and damage stability, monitoring, metacentric height, lever curve, heel, automation system

Введение

В ежегодном отчете за 2018 г Европейского агентства по безопасности на море (EMSA) опубликованы данные о чрезвычайных морских происшествиях, которые произошли с судами под флагом стран-членов ЕС, в территориальных морях и внутренних водах этих стран [1]. На рис.1 приведены общие потери судов под флагом стран-членов ЕС в период 2011-2017 годы.

Из графика видно, что рыболовные суда составляют основную массу погибших судов. Среди "потерянных" рыболовных судов основная масса принадлежит траулерам и судам с длиной до 30 м.

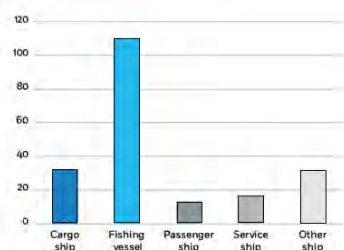


Рис.1 Потери судов под флагом стран-членов ЕС в период 2011-2017 годы.

Одними из самых опасных аварий судов являются аварии, связанные с затоплением аварийных отсеков и аварии, связанные с резким опрокидыванием неповрежденных судов. С точки зрения спасения экипажа и пассажиров судов второй тип аварии является наиболее опасным.

В тоже время, при авариях, связанных с затоплением аварийных отсеков одна из важных проблем состоит в определении промежутка времени, в течение которого экипажу необходимо оперативно покинуть аварийное судно (что особенно актуально для судов, эксплуатирующихся в Северной Атлантике и для боевых кораблей).

Проблема, связанная с быстрым «опрокидыванием» неаварийного судна на волнении имеет место для рыболовных судов, судов вспомогательного флота, а также судов, осуществляющих различные грузоподъемные операции. Необходимо также отметить, что для любых аварийных судов (и кораблей), когда авария сопровождается быстрым затоплением ряда отсеков, также возможно быстрое «опрокидывание» судна.

В обоих случаях оценка остойчивости осложняется неопределенностью (особенно для

рыболовных судов) по данным о текущем состоянии судна (в частности текущего значения аппликаты тяжести судна) и степени заполнения (затоплении или перетекании аварийных) отсеков судна.

В настоящий момент многие классификационные общества (включая РМРС) разрабатывают требования РС к судам, оборудованным системой автоматизированного мониторинга прочности корпуса и текущей остойчивости судна HMS (Hull Monitoring System), с введением соответствующих знаков в символ класса. Основной информацией, получаемой посредством HMS, является информация о фактических текущих значениях параметров прочности корпуса и остойчивости судна, измеряемых в режиме реального времени непосредственно в процессе навигации. Указанные параметры могут быть получены с использованием датчиков ускорения (для регистрации параметров линейных и угловых динамических перемещений корпуса с шестью степенями свободы), датчиков ветра, системы мониторинга волнового состояния поверхности моря, датчиков для регистрации напряжений общего изгиба и локальных напряжений конструктивных элементов корпуса и т.п. Кроме этого система HMS может быть связана с судовой навигационной системой, а также с грузовым компьютером судна.

1. Оценка остойчивости и прочности в текущем состоянии судна

Существующие подходы по оценке остойчивости неповрежденного судна ориентированы на использование ряда приближенных зависимостей. Так, во многих работах для оценки текущей метацентрической высоты предлагается использовать "капитанскую" формулу на основе определения собственного периода бортовой качки. Однако в работе [2] показано, что моделирование бортовой качки на нерегулярном волнении дает значения средних периодов, сильно отличающихся от собственных периодов бортовой качки. В результате величины метацентрических высот, определенные по "капитанской" формуле, оказываются намного выше действительных, особенно на слабом волнении (рис.2).

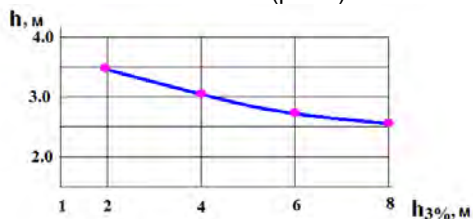


Рис.2. Зависимость метацентрической высоты, найденной по капитанской формуле, от высоты волн для нерегулярного волнения (реальное значение метацентрической высоты $h = 0.8$ м)

Очевидно, что в основе системы оперативной оценки остойчивости судна должны выступать параметры, на которые можно реально опереться при анализе текущего состояния судна.

К параметрам, которые можно определить с использованием системы HMS в режиме реального времени, относятся:

- осадки судна (на основе датчиков давления, установленных в 3-х точках по длине судна);

- параметры линейных и угловых динамических перемещений;
- диаграммы указанных параметров за определенный период времени;
- параметры ветра.

Кроме этого, к известным параметрам судна можно отнести:

- собственный период бортовой качки;
- данные о положении центра тяжести судна (при наличии грузового компьютера);
- диаграмма статической (динамической) остойчивости судна при заданной аппликате центра тяжести судна.

Если на судне отсутствует компьютерная программа расчета параметров безопасного мореплавания, то аппликата центра тяжести судна может быть определена путем задания базовой информации о принятых (удаленных) грузах, либо с использованием следующего алгоритма:

- при выходе судна в море фиксируется значение метацентрической. высоты судна (например, "на отход").
- на нерегулярном волнении определяется средний период крупных колебаний при бортовой качке и уточняется коэффициент K_c в формуле (1). Таким образом осуществляется "тарировка" системы. При этом имеется возможность сохранить (а затем использовать) в базе данных системы информацию об основных параметрах движения и качки судна.
- при приеме (удалении) груза или затоплении аварийного отсека меняется посадка судна и изменяется период колебаний. На основе этих изменений можно определить изменение положения цт судна

$$h = \left(\frac{K_c}{\tau_{\theta w}} \right)^2 \quad (1)$$

где $\tau_{\theta w}$ - средний период крупных колебаний при бортовой качке, с

Кроме этого, с использованием датчиков направления и силы ветра, имеется возможность оценить изменение метацентрической высоты путем определения дополнительного угла крена от известного ветрового воздействия (шквала) на судно.

2. Параметры системы автоматизированного мониторинга остойчивости

В основе системы, определяющей параметры остойчивости судна в режиме реального времени, предлагается текущая оценка остойчивости на основе оценки следующих текущих параметров судна:

- оценка периодов угловых и линейных вертикальных перемещений судна с точки зрения близости к состоянию обычного (когда показатель резонанса соответствует диапазону $0,7 < k_r < 1,3$) и параметрического резонанса (когда периоды угловых колебаний по крену $T_{кр}$ и периоды линейных вертикальных перемещений $T_{верт}$ близки к соотношению $T_{кр} = 2T_{верт}$) [3].
- оценка устойчивого повышения средних арифметических значений абсолютных максимумов угла рыскания.
- оценка текущего состояния остойчивости судна на основе текущих параметров диаграммы статической (динамической) остойчивости. В

качестве аналога такой оценки может выступать оценка текущей остойчивости по критерию погоды.

На основании данных, получаемых от предлагаемой системы, в режиме неаварийной эксплуатации судоводитель может изменить параметры движения судна (или подъема груза), а в случае аварийной ситуации (затопление отсеков) данные системы позволят предупредить судоводителя о необходимости пассажирам и экипажу срочно покинуть аварийное судно.

Для визуализации данных расчета предлагается выводить на экран бортового компьютера информацию с датчиков посадки судна, данные о качке и рыскании, данные о текущем положении судна на волне и диаграмму статической остойчивости судна с указанием реальных текущих

площадей кренящего и восстанавливающего моментов, а также предупреждение о приближении судна к опасному состоянию остойчивости.

Заключение

Предлагаемые в данной статье подходы определяют новые направления научных исследований в теории корабля - определение параметров текущей остойчивости судна на основании данных о судне, данных о текущей скорости, посадке, направлению движения относительно волн и ветра, качки, давления ветра, характеристикам волн и ветра и прочих параметров, которые могут быть определены с использованием системы HMS.

Литература

1. Annual overview of marine casualties and incidents 2018. An Agency of the European Union, EMSA, 2018.
2. Антоненко С.В. Практическая оценка остойчивости в открытом море по капитанской формуле. //Мореходство и морские науки –2009:избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (23 сентября 2009 г.) Под ред. В.Н.Храмушина. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – С. 21–28.
3. Ершов А.А., Теренчук А.В. Практический способ определения параметрического резонанса по бортовой качке судна. //Вестник , Выпуск 5(33), 2015. – С.19-23.
4. Гайкович А.И., Никитин Н.В., Вай Ян Вин Хтве Подход к оценке безопасности судна по остойчивости на начальных стадиях проектирования. Морские интеллектуальные технологии, № 3(45),Т.2, стр. 81-87.

References

1. Annual overview of marine casualties and incidents 2018. An Agency of the European Union, EMSA, 2018.
2. Antonenko S.V. Prakticheskaja ocenka ostojchivosti v otkrytom more po kapitanskoj formule [Practical estimation of the vessel stability in the open sea by the Captain formula]. Morehodstvo i morskije nauki. 2009:izbrannye doklady Vtoroj Sahalinskoj regional'noj morskoi nauchno-tehnicheskoi konferencii (23 sentjabrja 2009 g.) Pod red. V.N.Hramushina. Juzhno-Sahalinsk: SahGU, 2010. S. 21–28
3. Ershov A.A., Terenchuk A.V. Prakticheskij sposob opredelenija parametricheskogo rezonansa po bortovoj kachke sudna [Practical way of parametric resonance estimation by the vessel rolling]. Vestnik , Vypusk 5(33), 2015. S. 19-23.
4. Alexander I. Gaikovich, Nikolay V. Nikitin, Vay Jan Vin Khtve Podhod k ocenke bezopasnosti sudna po ostojchivosti na nachalnih stadiyah proektirovaniy [The approach to assessing the safety of the ship for stability at initial design stages]. Morskije intellektual'nye tekhnologii, № 3(45),Т.2, str. 81-87.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Николаевич Суслов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования судов, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

Ольга Витальевна Одегова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: osah@mail.ru

Сунь Тяньши, аспирант кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: qushufu@mail.ru

Alexander N. Suslov Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru,

Olga V. Odegova, Ph.D. (Eng), Docent, Docent of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation ,e-mail: osah@mail.ru

Sun Tanshi, graduate student of the Department of ship design, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation, e-mail: qushufu@mail.ru,

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.086

УДК 620.193.81

Создание противокоррозионного композиционного цинкового покрытия стали для эксплуатации в средах, содержащих сульфатредуцирующие бактерии

М. А. Агиевич¹, В. В. Гурченко¹, С. Чжай^{2,3}, Ц. Дуань^{2,3}, Б. Хоу^{2,3}, А. А. Грибанькова⁴¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ²Китайская академия наук, ³Пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), ⁴Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье исследовано создание композиционного электрохимического покрытия (КЭП) цинк-ингибитор со включением в состав органического вещества (ОС), обладающего биоцидным и ингибирующим действиями, которое может быть применено для защиты стали от коррозии в средах, содержащих сульфатредуцирующие бактерии (СРБ). Покрытие наносилось на сталь методом электрохимического осаждения. Включение ОС осуществлялось путём модификации сернокислого электролита цинкования. Оценка защитного действия КЭП против микробиологической коррозии проведена в ходе лабораторного исследования образцов с покрытиями, находящимися в инокулированной СРБ питательной среде Постгейта «Б» в течение 7 суток. В ходе исследования определены такие параметры, как изменения электродного потенциала образцов в среде, водородного показателя и окислительно-восстановительного потенциала среды, концентраций бактериальных клеток и биогенного сероводорода. По окончании испытаний определены скорость коррозии и защитный эффект покрытия гравиметрическим методом.

Оценка ингибирующего действия проведена методами электрохимической импедансной спектроскопии и поляризационных кривых образцов с КЭП, экспонируемых в течение 7 суток в инокулированной СРБ питательной среде Постгейта «Б».

В ходе исследования обнаружены: улучшение структуры покрытия благодаря введению ОС, биоцидные и ингибирующие действия КЭП, снижение скорости коррозии КЭП приблизительно в 2 раза по отношению к цинковому покрытию.

Ключевые слова: цинкование, композиционные покрытия, защита от коррозии, биоциды, ингибиторы коррозии, сульфатредуцирующие бактерии, сероводородная коррозия.

Creation of anti-corrosion composition zinc coating of steel for operation in the media containing sulfate-reducing bacteria

Maria A. Agievich¹, Valentin V. Gurchenko¹, Xiaofan Zhai^{2,3}, Jizhou Duan^{2,3}, Baorong Hou^{2,3}, Anzhela A. Gribankova⁴¹Immanuel Kant Baltic Federal University, ²Chinese Academy of Sciences, ³Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), ⁴St. Petersburg State Marine Technical University

Abstract. The article investigated the creation of a composite electrochemical coating (CEC) zinc-inhibitor with the inclusion of an organic compound (OC) with biocidal and inhibitory effects, which can be used to protect steel from corrosion in environments containing sulfate-reducing bacteria (SRB). The coating was applied to steel by electrochemical deposition. The OC was turned on by modifying the zinc sulfate electrolyte.

The evaluation of the protective effect of CEC against microbiological corrosion was carried out during a laboratory study of samples with coatings placed in a Postgate "B" inoculated SRB medium for 7 days. In the course of the study, such parameters as changes in the electrode potential of samples in the medium, hydrogen index and redox potential of the medium, concentrations of bacterial cells and biogenic hydrogen sulfide were determined. At the end of the tests, the corrosion rate and the protective effect of the coating by the gravimetric method were determined.

Evaluation of the inhibitory effect was carried out by electrochemical impedance spectroscopy and polarization curves of samples with CEC, exposed for 7 days in inoculated SRB nutrient medium Postgate "B".

The study found: improvement of the coating structure due to the introduction of OC, the biocidal and inhibitory effects of CEC, a decrease in the corrosion rate of CEC by about 2 times with respect to the zinc coating.

Key words: galvanizing, composite coatings, corrosion protection, biocides, corrosion inhibitors, sulfate-reducing bacteria, hydrogen sulfide corrosion.

Введение

Проблема коррозии на сегодняшний день является одной из важнейших в хозяйственной деятельности человека [1]. Так, согласно данным Международной ассоциации инженеров-коррозионистов (NACE), в 2013 году мировые экономические потери, вызванные коррозией,

оцениваются в 2,505 трлн. долларов США, что эквивалентно 3,4 % мирового ВВП. Использование доступных противокоррозионных практик позволяет сохранить порядка 15–35 % финансовых средств и в мировом масштабе составляет порядка 375–875 млрд. долларов США в год, что является существенной экономией. В России коррозионные потери составляют порядка 2,113 млрд. долларов США, что оценивается в 4,0 % её ВВП [2].

Известно, что микробиологический фактор является причиной 50–80 % общих коррозионных потерь. Среди микроорганизмов, инициирующих микробиологическую коррозию, особенно активными являются сульфатредуцирующие бактерии (СРБ), так как они способствуют питтинговой коррозии. Кроме того, выделяемый в результате их жизнедеятельности сероводород приводит к наводороживанию металла и, как следствие, сульфидному растрескиванию [3].

Наиболее рациональным путём подавления микробиологической коррозии представляется применение органических соединений (ОС), обладающих биоцидными и ингибирующими электрохимическую коррозию действиями, введённых непосредственно в коррозионную среду [4] либо в состав защитного противокоррозионного покрытия [5].

Повышенное внимание современных исследователей обращено на разработку и анализ новых противокоррозионных покрытий. Среди большого количества исследований по покрытиям особый интерес представляют в том числе следующие темы:

- «зелёные технологии»;
- модификация покрытий при добавлении ингибиторов коррозии (ИК);
- нетоксичные противообрастающие покрытия [6].

Широко применяются и интенсивно развиваются электрохимические методы нанесения защитных покрытий. Процесс нанесения гальванических покрытий сравнительно прост и может быть осуществлён без сложного дорогостоящего оборудования. В ряде современных технологий гальванические покрытия являются конкурентоспособным и перспективным материалом [7].

Цинковые покрытия, будучи дешёвыми, занимают одно из ведущих мест в практике нанесения гальванопокрытий. Около 3/4 всех цинковых покрытий приходится на стальные листы, полосы, трубы и проволоку [7].

Создание композиционных электрохимических покрытий (КЭП) является одним из актуальных направлений современной гальванотехники [8]. Модифицирование электрохимических покрытий путем введения частиц второй фазы в состав покрытия, то есть получение КЭП является довольно эффективным методом управления их свойствами [9].

Согласно вышеизложенному, ингибирование микробиологической коррозии путём создания на поверхности металла защитного КЭП цинк-ингибитор с включением ОС, проявляющих биоцидное и ингибирующее электрохимическую коррозию действия, представляется актуальной научной задачей противокоррозионной защиты металлов.

Целью данной работы являлось создание противокоррозионного композиционного цинкового покрытия стали для эксплуатации в средах, содержащих сульфатредуцирующие бактерии.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- получение КЭП с включением в их состав ОС, которые могут выступать в роли биоцидов и ИК;

- исследование биоцидного действия полученных КЭП;
- исследование ингибирующего действия полученных КЭП.

1. Методика эксперимента

Исследованное ОС вводилось в сернокислый электролит цинкования (СЭЦ) состава, приведённого в таблице 1, в концентрациях 1, 2 и 5 ммоль·л⁻¹. Нанесение КЭП из полученного СЭЦ производилось методом электрохимического осаждения на пластинчатые образцы стали марки Ст3 размера 50,0 × 16,5 × 1,0 мм при катодных плотностях тока 5, 10, 20, 30 и 40 мА·см⁻².

Таблица 1

Состав СЭЦ

Компонент	С, г·л ⁻¹
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	250,0
Na ₂ SO ₄	80,0
Al ₂ SO ₄ ·18H ₂ O	40,0
H ₃ BO ₃	26,0
желатина	1,00

Подготовка поверхности стальных образцов для нанесения КЭП производилась путём зачистки поверхности мелкозернистой наждачной бумагой с последующей обработкой ацетоном (99,75 мас. %) и пастой из венской извести (СаО, 95 мас. %; MgO, 5 мас. %). Затем промывалась дистиллированной водой до полного удаления остатков венской извести и насухо высушивалась струёй горячего воздуха. Обратная сторона изолировалась самоклеящейся изоляционной лентой и образец взвешивался на аналитических весах.

Электроосаждение КЭП производилось при помощи потенциостата Elins P-45X, подключённого по трёхэлектродной схеме со стандартным хлорсеребряным электродом (СХЭ в качестве электрода сравнения («Work» – стальной катод, «Ref» – СХЭ, «Counter» и «Comp» вместе – цинковый анод), для записи хронопотенциограммы катода. Объём гальванических ванночек составлял 100 мл, положения стального образца (катода), цинкового анода, электролитического ключа и электрода сравнения фиксировались при помощи штатива.

Продолжительность электроосаждения КЭП соответствовала времени, необходимому для получения покрытия толщиной 40 мкм (табл. 2) и определена по формуле:

$$t = \frac{l \cdot \rho_{Zn} \cdot 6}{K_{Zn} \cdot D_k \cdot B T_{Zn}}, \quad (1)$$

где t – продолжительность электроосаждения в мин, l – толщина покрытия равная 40 мкм, ρ_{Zn} – плотность цинка 7,133 г·см⁻³, K_{Zn} – электрохимический эквивалент цинка 1,22 г·А⁻¹·ч⁻¹, D_k – катодная плотность тока в мА·см⁻², $B T_{Zn}$ – выход по току цинка равный 96 %.

Таблица 2
Продолжительность электроосаждения КЭП из СЭЦ

Дк, мА·см ⁻²	t, мин
5	292
10	146
20	73
30	49
40	37

По окончании процесса электроосаждения, пластины извлекались из электролита, промывались дистиллированной водой до полного удаления остатков электролита, удалялись дендриты мягкой щёткой с пластиковой щетиной и тотчас высушивались насухо под струёй горячего воздуха и взвешивались на аналитических весах.

Накопительная культура СРБ рода *Desulfovibrio* получалась путём многократного пересева пробы воды, полученной из природного источника, на питательной среде Постгейта «Б» (табл. 3).

Таблица 3
Состав питательной среды Постгейта «Б»

Компонент	С, г·л ⁻¹
NaCl	7,5
MgSO ₄	1,0
Na ₂ SO ₃	1,0
Na ₂ SO ₄	2,0
NaH ₂ PO ₄	0,5
Ca(C ₃ H ₅ O ₃) ₂	2,0

В простерилизованную в автоклаве в течение 30 минут при температуре 121 °С коническую колбу, ёмкостью 250–500 мл вносилось 0,5 мл накопительной культуры СРБ, затем доверху доливалась стерильная питательная среда Постгейта «Б» и вносилась зачищенная наждачной бумагой стальная пластина, подвешенная на леску, и колба закрывалась резиновой пробкой таким образом, чтобы в ней не оставалось пузырей воздуха.

По окончании 48 часов в питательной среде определены:

- водородный показатель;
- окислительно-восстановительный потенциал;
- концентрация клеток СРБ;
- концентрация биогенного сероводорода.

Далее питательная среда разливалась доверху в простерилизованные в автоклаве в течение 30 минут при температуре 121 °С пробирки ёмкостью 50 мл в которые погружались по одному исследуемому стальному образцу с КЭП, подвешенному на леске, и начинались ежесуточные измерения во всех пробирках вышеуказанных параметров питательной среды, а также электродного потенциала образцов с КЭП.

Измерения водородного показателя и окислительно-восстановительного потенциала среды проводились при помощи комбинированных стеклянного HANNA HI1131 и платинового электродов соответственно на рН/ОВП-метре

HANNA HI2215. Перед каждой серией измерений проводилась калибровка по 2 точкам стандартными буферными растворами с рН 4,01 и 10,00.

Концентрация клеток СРБ определялась путём прямого подсчёта бактериальных клеток в счётной камере Горяева при помощи микроскопа Carl Zeiss Axio Lab.A1 при 400-кратном увеличении. Проводился подсчёт клеток в 6 малых квадратах, расположенных по диагонали сетки камеры, с последующим усреднением и пересчётом количества клеток СРБ на 1 мл объёма среды.

Измерение электродного потенциала образца проводилось при помощи мультиметра АКТАКОМ-IWATSU ABM-4403 относительно СХЭ с последующим переводом значений электродного потенциала в стандартную водородную шкалу. К исследуемому образцу, находящемуся в коррозионной среде Постгейта «Б», подводился капилляр Луггина на конце п-образного электролитического ключа, заполненного агаризованным насыщенным раствором хлорида калия, другой же конец ключа погружался в насыщенный раствор хлорида калия, в котором находился СХЭ. Непогружённой части образца касался щуп мультиметра.

Концентрация сероводорода определялась йодометрическим методом. К 2,5 мл исследуемой пробы питательной среды добавлялось 0,5 мл 10 % раствора (CH₃COO)₂Pb. Полученный осадок PbS отделялся декантацией при центрифугировании и трехкратно промывался дистиллированной водой и затем растворялся в 1,0 мл (избыток) водного раствора I₂, подкисленным 0,5 мл 1 моль·л⁻¹ HCl. Остаток йода оттитровывался стандартным раствором Na₂S₂O₃ с концентрацией 0,005 г-экв·л⁻¹. Концентрация сероводорода рассчитана по формуле:

$$C(H_2S) = \frac{\Delta V(Na_2S_2O_3) \cdot C(Na_2S_2O_3) \cdot 500}{V(I_2)}, \quad (2)$$

где $C(H_2S)$ – концентрация сероводорода в ммоль·л⁻¹, $\Delta V(Na_2S_2O_3)$ – разность объёмов, пошедших на титрование холостой и исследуемой проб, $C(Na_2S_2O_3)$ – концентрация титранта, $V(I_2)$ – объём раствора йода, добавленного к холостой и исследуемой пробам.

По результатам гравиметрических измерений образцов с КЭП до и после микробиологических коррозионных испытаний определена скорость коррозии (форм. 3) и защитный эффект (форм. 4).

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \quad (3)$$

где K – скорость коррозии в мкг·см⁻²·сут⁻¹, Δm – разность масс образцов в мкг, S – площадь КЭП в см², t – время экспозиции равное 7 сут.

$$Z_{\text{прав}} = \frac{\Delta K}{K} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $Z_{зрав}$ – защитный эффект в %, ΔK – разность скоростей коррозии контрольного образца и образца с КЭП, K – скорость коррозии контрольного образца.

Сопротивление переноса заряда и ток коррозии определены при помощи потенциостата Elins P-45X в электрохимических ячейках со средой Постгейта «Б», инокулированной накопительной культурой СРБ. Ячейка состояла из конической колбы ёмкостью 100 мл с резиновой пробкой, через отверстия которой проходят контакты квадратного исследуемого образца, изолированного эпоксидной смолой, с площадью рабочей поверхности 1 см^2 и платинового проволочного электрода, и капилляр Лuggина, подходящий к образцу и заполненный агаризированным насыщенным раствором хлорида калия. Измерения электрохимического импеданса проводились каждый день в течение 7 суток. На 7 сутки были получены катодные поляризационные кривые. По анализу диаграмм Найквиста и поляризационных кривых вычислены значения защитных эффектов по формулам 5 и 6. Диаграммы Найквиста анализировались согласно эквивалентной схеме, приведённой на рисунке 1. Ток коррозии определён по экстраполяции тафелевских участков поляризационных кривых.

$$Z_{имп} = \frac{\Delta R_{пз}}{R_{пз}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $Z_{имп}$ – защитный эффект в %, $\Delta R_{пз}$ – разность сопротивлений переноса заряда контрольного образца и образца с КЭП, $R_{пз}$ – сопротивление переноса заряда образца с КЭП.

$$Z_{пол} = \frac{\Delta I_{кор}}{I_{кор}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $Z_{пол}$ – защитный эффект в %, $\Delta I_{кор}$ – разность токов коррозии контрольного образца и образца с КЭП, $I_{кор}$ – сопротивление переноса заряда контрольного образца.

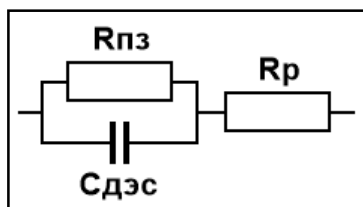


Рис. 1. Эквивалентная схема для анализа диаграмм Найквиста: R_p – сопротивление раствора, $C_{дэс}$ – ёмкость двойного электрического слоя, $R_{пз}$ – сопротивление переноса заряда

2. Результаты и обсуждение

По анализу полученных экспериментальных данных определено, что лучшими показателями обладают КЭП, осаждённые при катодной плотности тока равной $40 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, поэтому далее приводятся данные только для данных плотностей тока.

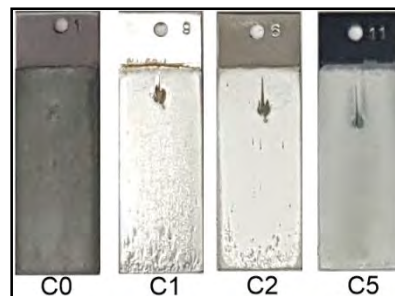


Рис. 2. Внешний вид КЭП, осаждённых при катодной плотности тока равной $40 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$

На рисунке 3 приведена динамика изменения электродного потенциала образцов с КЭП в течение 7 дней экспозиции. Отрицательные значения электродных потенциалов свидетельствуют о протекании анодного процесса – растворения металла. Прекращение смещения потенциала на вторые сутки экспозиции объясняется образованием сульфидной плёнки на поверхности КЭП, обладающей экранирующей способностью. Потенциал образцов с КЭП, полученными из СЭЦ, содержащих исследуемое ОС во всех концентрациях, смещается в сторону более положительных значений по отношению к потенциалу образцов с КЭП, полученным без введения ОС (контрольное покрытие), что свидетельствует о замедлении анодной реакции. Более эффективна большая концентрация ОС.

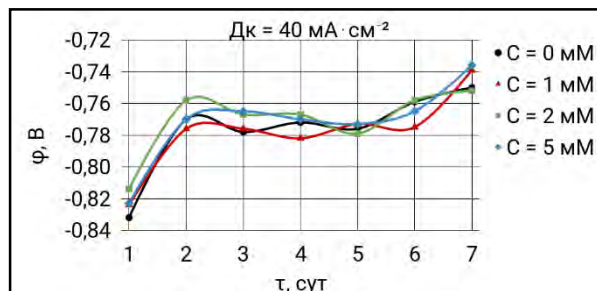


Рис. 3. Электродный потенциал образцов с КЭП в инокулированной СРБ среде Постгейта «Б»

Поскольку в ходе жизнедеятельности СРБ сульфат-ионы восстанавливаются до сульфид-ионов, которые подвергаются гидролизу в водной среде, представляется удобным отслеживать развитие СРБ по смещению величины рН в область более щелочных значений, вызванному уменьшением содержания сульфат-ионов в питательной среде.

Из рисунка 4 видно, что в течение всего времени экспозиции происходит закономерное смещение рН среды в область более щелочных значений, что свидетельствует о развитии СРБ. На 5 сутки смещение рН прекращается из-за торможения активности и гибели СРБ вследствие нахождения в замкнутой среде. Наличие в среде образцов с КЭП, полученными из СЭЦ, содержащих исследуемое ОС во всех концентрациях, приводит к торможению жизнедеятельности СРБ, что показано более кислыми значениями рН относительно среды с контрольными образцами. Наилучший эффект показывает ОС в концентрации $1 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$.

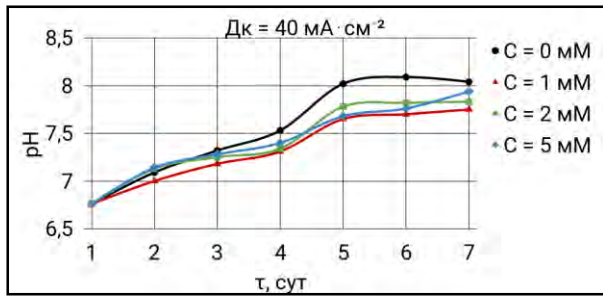


Рис. 4. Водородный показатель инокулированной СРБ среды Постгейта «Б» с экспонируемыми образцами с КЭП

Положительные значения ОВП характерны для сред, обладающих окислительной способностью, тогда как отрицательные для сред с восстановительной. На графике (рис. 5) значения ОВП находятся в отрицательной области потенциалов, что свидетельствует о восстановительной способности среды в связи с накоплением восстановленных форм серы – сульфид-ионов и сероводорода. Нахождение в среде образцов с КЭП, осажённых из СЭЦ с концентрацией ОС равной 1 ммоль·л⁻¹ приводит к смещению ОВП в область более положительных значений по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о снижении продукции сульфид-ионов и сероводорода.

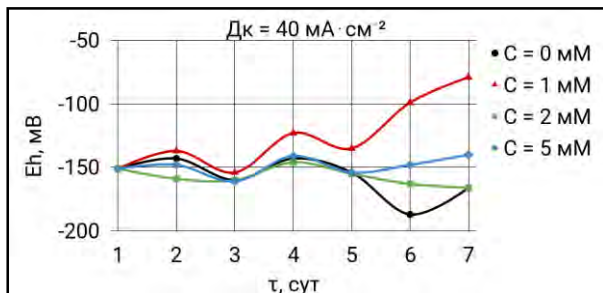


Рис. 5. Окислительно-восстановительный потенциал инокулированной СРБ среды Постгейта «Б» с экспонируемыми образцами с КЭП

Наличие сероводорода в среде является прямым следствием жизнедеятельности СРБ, поэтому его содержание может служить характеристикой бактериальной активности в коррозионной среде. Нахождение в среде образцов с КЭП, содержащих ОС, приводит к снижению продукции биогенного сероводорода в следствие угнетения жизнедеятельности СРБ (рис. 6).

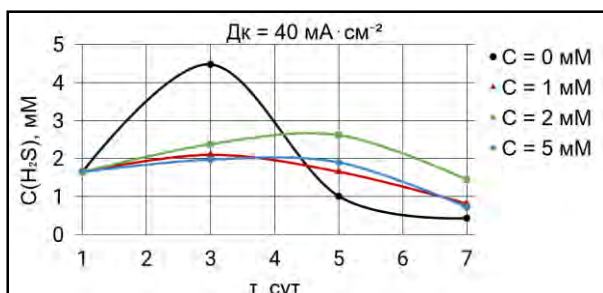


Рис. 6. Концентрация биогенного сероводорода в инокулированной СРБ среде Постгейта «Б» с экспонируемыми образцами с КЭП

Только нахождение в среде образцов с КЭП, осажённых при максимальной исследованной концентрации ОС, приводит к снижению численности клеток СРБ относительно контрольного образца (рис. 7) на всём протяжении эксперимента. ОС в концентрации 1 ммоль·л⁻¹ также снижает численность СРБ, но только на 5–7 сутки.

По данным скоростей коррозии и защитных эффектов КЭП (табл. 4) видно, что большая концентрация ОС в электролите приводит к лучшей общей коррозионной стойкости покрытий.

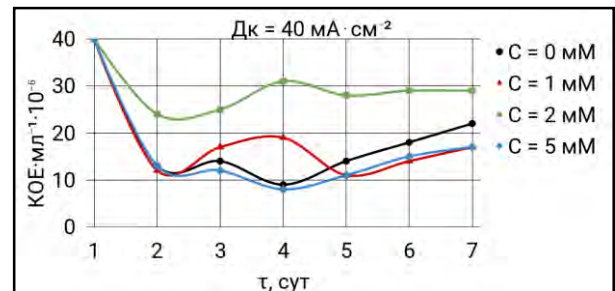


Рис. 7. Концентрация бактериальных клеток СРБ в инокулированной среде Постгейта «Б» с экспонируемыми образцами с КЭП

Таблица 4

Скорость коррозии и защитный эффект КЭП

C(ОС), ммоль·л ⁻¹	K, мкг·см ⁻² ·сут ⁻¹	Z _{грав} , %
0	568	–
1	571	–0,6
2	522	8,0
5	299	47,4

Далее приведены данные для концентраций ОС равных 5 ммоль·л⁻¹, так как Z_{грав} для данной концентрации имеет максимальное значение. Анализ диаграммы Найквиста показал, что введение ОС в КЭП увеличивает радиус полуокружности (рис. 8), что свидетельствует об увеличении сопротивления переноса заряда в коррозионной реакции. Анализ катодной поляризационной кривой показал снижающее ток коррозии действие ОС в покрытии (рис. 9). Значения полученных защитных эффектов Z_{имп} и Z_{пол} приведены в таблице 5.

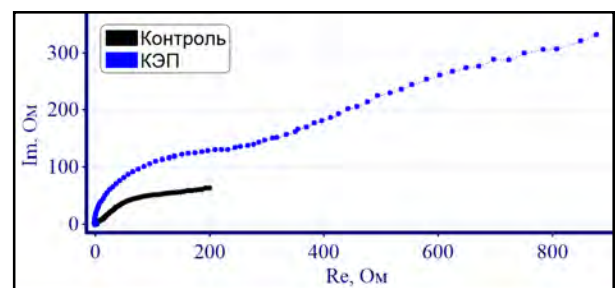


Рис. 8. Диаграммы Найквиста КЭП (Dк = 40 МА·см⁻², C(ОС) = 5 ммоль·л⁻¹)

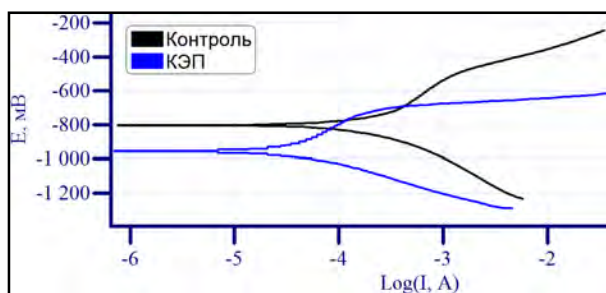


Рис. 9. Потенциостатические поляризационные кривые КЭП ($D_k = 40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $C(\text{OC}) = 5 \text{ ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$)

Таблица 5
Сопrotивление переносу заряда ($R_{пз}$), ток коррозии ($I_{кор}$) и защитные эффекты $Z_{имп}$ и $Z_{пол}$ КЭП ($D_k = 40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $C(\text{OC}) = 5 \text{ ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$)

День	$R_{пз}$, Ом·см ²		$Z_{имп}$, %	$I_{кор}$, мкА·см ⁻²		$Z_{пол}$, %
	Без ОС	КЭП		Без ОС	КЭП	
1	356	708	49,8			
2	148	488	67,1	–	–	–
3	240	990	75,7			

Дополнительная информация

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-53-53034 ГФЕН_а «Фундаментальное исследование передовых зеленых противообрастающих и коррозионностойких в морской среде композиционных металлических покрытий и технологий».

Литература

1. Экилик В. В. Теория коррозии и защита от коррозии: методическое пособие по спецкурсу / В. В. Экилик. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. гос. ун-та, 2004. – 67 с.
2. International Measures of Prevention Application, and Economics of Corrosion Technologies Study / G. Koch, J. Varney, N. Thompson et al. // NACE International, 2016. – 216 p. URL: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf> (дата обращения: 06.07.2019).
3. Гамидова Н. С. Защита нефтепромыслового оборудования от микробиологической коррозии реагентами серии «Нефтегаз» / Н. С. Гамидова, Н. А. Азимова, А. В. Ахмедова // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2013. – № 2 (2). – С. 71–75.
4. Голяк Ю. В. Ингибирующие свойства некоторых органических биоцидов при коррозии алюминия в средах с бактериальной (СРБ) сульфоредукцией / Ю. В. Голяк, С. М. Белоглазов // Вестн. Тамб. ун-та. Сер.: естеств. и техн. науки. – 1999. – Т. 4. – № 2. – С. 209–210.
5. Zhai X. Composite deposition mechanism of 4,5-dichloro-2-n-octyl-4-isothiazolin-3-one in zinc films for enhanced corrosion resistant properties / X. Zhai, C. Sun, K. Li et al. // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2016. – Vol. 36. – P. 147–153.
6. Кабалов Е. Н. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии / Е. Н. Кабалов, О. В. Старцев, И. М. Медведев // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2. – С. 76–87.
7. Гамбург Ю. Д. Гальванические покрытия: справочник по применению / Ю. Д. Гамбург. – М.: Изд-во Техносфера, 2006. – 216 с.
8. Целуйкин В. Н. Электрохимическое осаждение композиционных покрытий на основе никеля и меди: кинетические закономерности и свойства осадков: автореф. дис. ... д-р. техн. наук / В. Н. Целуйкин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т., 2009. – 40 с.
9. Иванина И. С. Теоретические аспекты образования композиционных покрытий из электролитов-коллоидов / И. С. Иванина, М. В. Колчина // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 4 (13). С. 64–68.

References

1. Ekilik, V. V. Teoriya korrozii i zashchita ot korrozii: metodicheskoye posobiye po spetskursu [Theory of corrosion and protection against corrosion: a special course manual]. Rostov-na-Donu, RGU, 2004. 67 p.
2. Koch, G., Varney, J., Thompson, N. et al. International Measures of Prevention Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. NACE International, 2016. 216 p.
3. Gamidova, N. S., Azimova, N. A., Akhmedova, A. V. Zashchita neftepromyslovogo oborudovaniya ot mikrobiologicheskoy korrozii reagentami serii «Neftegaz» [Protection of oilfield equipment from microbiological corrosion with reagents of the «Neftegaz» series]. Nauchnye Trudy NIPi Neftegaz GNKAR, 2013. № 2 (2). P. 71–75.

4	258	924	72,1			
5	355	1105	67,9			
6	248	758	67,3			
7	183	410	55,4	225	120	46,7

Заключение

1. Введение ОС в СЭЦ улучшает видимую структуру покрытия;
2. Полученные КЭП обладают ингибирующим микробиологическую коррозию действием, а также при больших концентрациях ОС в СЭЦ наблюдается снижение скорости общей коррозии;
3. Наилучшим снижающим микробиологическую коррозию действием обладает КЭП, осаждённый при катодной плотности тока $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ и концентрацией ОС в СЭЦ равной $1 \text{ ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$, однако наилучший защитный эффект от общей коррозии наблюдается у КЭП, осаждённых при катодной плотности тока $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ и концентрацией ОС в СЭЦ равной $5 \text{ ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$;
4. Данные защитных эффектов $Z_{грав}$, $Z_{имп}$ и $Z_{пол}$ хорошо согласуются между собой.

4. Golyak, Yu. V., Beloglazov S. M. Ingibiruyushchie svoystva nekotorykh organicheskikh biotsidov pri korrozii alyuminiya v sredakh s bakterial'noy (SRB) sulfatreduktsiyey [Inhibitory properties of certain organic biocides in aluminum corrosion in environments with bacterial (SRB) sulforeduction]. Vestnik TGU: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki, 1999. Vol. 4. № 2. P. 209–210.
5. Zhai, X., Sun, C., Li, K. et al. Composite deposition mechanism of 4,5-dichloro-2-n-octyl-4-isothiazolin-3-one in zinc films for enhanced corrosion resistant properties. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016. Vol. 36. P. 147–153.
6. Kabalov, Ye. N., Startsev, O. V., Medvedev, I. M. Obzor zarubezhnogo opyta issledovaniy korrozii i sredstv zashchity ot korrozii [Overview of foreign experience in corrosion research and corrosion protection]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii, 2015. № 2. P. 76–87.
7. Gamburg, Yu. D. Gal'vanicheskiye pokrytiya: spravochnik po primeneniyu [Electroplating: application guide]. Tekhnosfera, 2006. 216 p.
8. Tseluykin, V. N. Elektrokhimicheskoe osazhdeniye kompozitsionnykh pokrytiy na osnove nikelya i medi: kineticheskiye zakonomernosti i svoystva osadkov [Electrochemical deposition of composite coatings based on nickel and copper: kinetic laws and properties of precipitation]. Saratov, SGTU, 2009. 40 p.
9. Ivanina, I. S., Kolchina, M. V. Teoreticheskiye aspekty obrazovaniya kompozitsionnykh pokrytiy iz elektrolitov-kolloidov [Theoretical aspects of the formation of composite coatings from colloidal electrolytes]. Molodoy issledovatel' Dona, 2018. № 4 (13). P. 64–68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мария Алексеевна Агиевич, кандидат химических наук, доцент с учёной степенью кандидат наук института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: agievichmaria@mail.ru

Валентин Викторович Гурченко, аспирант института живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: benzvalen@gmail.com

Сяофан Чжай, кандидат химических наук, доцент, основная лаборатория морской коррозии и биообрастания CAS, институт океанологии, Китайская академия наук, 266071 Циндао, КНР; открытая студия по защите от коррозии и защиты морской среды, пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), 266235 Циндао, КНР; центр мега науки океана, Китайская академия наук, Циндао, КНР, e-mail: zxf_8968@163.com

Цзичжоу Дуань, профессор, основная лаборатория морской коррозии и биообрастания CAS, институт океанологии, Китайская академия наук, 266071 Циндао, КНР; открытая студия по защите от коррозии и защиты морской среды, пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), 266235 Циндао, КНР; центр мега науки океана, Китайская академия наук, Циндао, КНР, e-mail: duanjz@ms.qdio.ac.cn

Баоронг Хоу, академик, основная лаборатория морской коррозии и биообрастания CAS, институт океанологии, Китайская академия наук, 266071 Циндао, КНР; открытая студия по защите от коррозии и защиты морской среды, Пилотная национальная лаборатория по морской науке и технике (Циндао), 266235 Циндао, КНР; центр мега науки океана, Китайская академия наук, Циндао, КНР, e-mail: houb@qdio.ac.cn

Анжела Алексеевна Грибанькова, доктор педагогических наук, кандидат химических наук, доцент, профессор кафедры химии факультета естественнонаучного и гуманитарного образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Gribankova@smtu.ru

Maria A. Agievich, Ph.D. (Chem), Assistant Professor of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: agievichmaria@mail.ru

Valentin V. Gurchenko, Graduate Student of School of Life Science, Immanuel Kant Baltic Federal University, A. Nevskogo, 14, Kaliningrad 236016, Russian Federation, e-mail: benzvalen@gmail.com

Xiaofan Zhai, Ph.D. (Chem), Associate Professor, CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 266071 Qingdao, PR China; Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), 266235 Qingdao, PR China; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, PR China, e-mail: zxf_8968@163.com

Jizhou Duan, Professor, CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 266071 Qingdao, PR China; Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), 266235 Qingdao, PR China; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, PR China, e-mail: duanjz@ms.qdio.ac.cn

Baorong Hou, Academician, CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 266071 Qingdao, PR China; Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), 266235 Qingdao, PR China; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, PR China, e-mail: houb@qdio.ac.cn

Anzhela A. Gribankova, Dr.Sci.(Edu), Ph. D. (Chem), Assistant Professor, Professor of Department of Chemistry, Faculty of Science and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Gribankova@smtu.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.035

УДК 621.311

Способы компенсации высших гармоник напряжения в судовых электроэнергетических системах

А.С. Корнев¹, В.И. Кузнецов¹, Х. Пань¹, А.П. Сеньков¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В статье выполнен анализ способов компенсации высших гармоник в судовой сети единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС), в составе которой, основным потребителем электроэнергии является система электродвижения (СЭД). Рассмотрены три схемы компенсации высших гармоник, создаваемых неуправляемыми выпрямителями, входящими в состав преобразователей частоты (ПЧ). Проведено компьютерное моделирование фрагмента структуры ЕЭЭС, запатентованной фирмой «Siemens», схемы 18-пульсного выпрямителя, а также схемы с двумя 12-пульсными выпрямителями. Результаты моделирования показали, что в структуре ЕЭЭС фирмы «Siemens», пропульсивный трансформатор обеспечивает компенсацию только части высших гармоник, из-за чего, искажения формы напряжения в судовой сети могут быть значительными. Схема, содержащая два 12-пульсных выпрямителя, а также трехфазный трансформатор с четырьмя трехфазными обмотками, имеющими сдвиг фаз на 15 электрических градусов, показала наилучшие показатели по качеству тока, обеспечивая эффективную компенсацию 5, 7, 11, 13 гармонических составляющих тока. Предложенная схема с двумя 12-пульсными выпрямителями позволяет в составе ПЧ применить трехуровневые автономные инверторы напряжения, характеризующиеся высоким качеством тока в обмотках гребного электродвигателя.

Ключевые слова: единая электроэнергетическая система, система электродвижения, электромагнитная совместимость, компенсация гармоник, 12-пульсный выпрямитель, 18-пульсный выпрямитель, пропульсивный трансформатор, преобразователь частоты, многоуровневый автономный инвертор напряжения

Methods for compensation of high voltage harmonics in shipboard electric power systems

Aleksandr S. Kornev¹, Viktor I. Kuznetsov¹, Hangyu Pan¹, Aleksey P. Sen'kov¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the methods for compensating for higher harmonics in the ship network of the unified electric power system (UEPS), in which the main electric power consumers are electric propulsion systems (EPS). Three compensation schemes for higher harmonics created by uncontrolled rectifiers that are part of frequency converters are considered. Computer simulation of a fragment of the UEPS structure patented by Siemens, an 18-pulse rectifier circuit, and also circuits with two 12-pulse rectifiers were carried out. The simulation results showed that in the Siemens UEPS structure, a propulsive transformer provides compensation for only a part of the higher harmonics, due to which, voltage waveform distortions in the ship network can be significant. The circuit, containing two 12-pulse rectifiers, as well as a three-phase transformer with four three-phase windings having a phase shift of 15 electrical degrees, showed the best current quality indicators, providing effective compensation for 5, 7, 11, 13 harmonic components of the current. The proposed circuit with two 12-pulse rectifiers allows the use of three-level autonomous voltage inverters, which are characterized by high quality current in the windings of the propeller motor, as part of the frequency converter.

Key words: unified electric power system, electric movement system, electromagnetic compatibility, harmonics compensation, 12-pulse rectifier, 18-pulse rectifier, propulsive transformer, frequency converter, multi-level autonomous voltage inverter.

Введение

Широкое применение систем электродвижения (СЭД) на отечественных и иностранных судах различных типов, объясняется рядом известных преимуществ СЭД перед традиционными пропульсивными комплексами. Применение СЭД позволяет значительно повысить маневренные качества судов, безопасность плавания, а также повысить надежность электроснабжения судовых систем. На судах с СЭД общесудовые потребители и СЭД снабжаются электроэнергией от общей электростанции, что обеспечивает высокую степень резервирования судовой системы электроэнергетики. Однако при этом возникает проблема электромагнитной совместимости СЭД и

общесудовых потребителей. В состав СЭД входят статические преобразователи частоты (ПЧ), которые обеспечивают регулировку частоты вращения гребных электродвигателей (ГЭД) в широком диапазоне. Преобразователи частоты, состоящие из неуправляемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения, являются нелинейной нагрузкой для судовой сети и создают искажения формы напряжения в судовой сети. При этом СЭД является основным потребителем электроэнергии на судах с ЕЭЭС, и ПЧ могут создать значительные искажения напряжения судовой сети. В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства для обеспечения нормальной работы судового электрооборудования, значение суммарного коэффициента гармонических

составляющих кривой напряжения не должно превышать 8% [1]. Решение задачи по обеспечению электромагнитной совместимости СЭД и остальных судовых потребителей на судах с ЕЭЭС обеспечивается путем компенсации высших гармоник напряжения судовой сети за счет рационального выбора структуры ЕЭЭС с СЭД.

1. Типовая структура ЕЭЭС фирмы «Siemens»

Задача электромагнитной совместимости достаточно хорошо решена в структуре ЕЭЭС запатентованной фирмой «Siemens» [2]. На рисунке 1 представлен фрагмент структуры ЕЭЭС фирмы «Siemens», согласно которой, в качестве источников электроэнергии используются трехфазные синхронные генераторы (6, 7), которые подключаются трехфазной линии (12) главного распределительного щита. Остальные судовые потребители питаются от фидера (16), который соединен с вторичной обмоткой трансформатора (14), первичная обмотка которого подключена к линии 12. Система электродвижения состоит из пропульсивного трансформатора (38), преобразователя частоты (18), асинхронного электродвигателя (23), судового движителя (33).

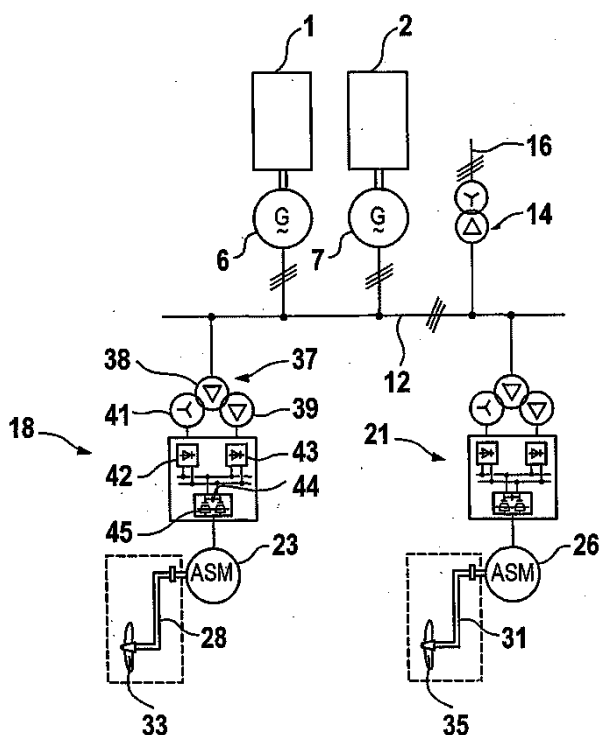


Рис. 1. Схема ЕЭЭС фирмы «Siemens»

Задача по обеспечению электромагнитной совместимости, в данной структуре, решена путем применения пропульсивного трансформатора (38), на котором располагаются две вторичные обмотки соединенные «звездой» и «треугольником». К вторичным обмоткам трансформатора подключаются трехфазные выпрямители, соединенные последовательно или параллельно, тем самым образуя 12-пульсный выпрямитель, характеризующийся малыми пульсациями

выходного напряжения. Различные схемы соединения вторичных обмоток пропульсивного трансформатора позволяют применить 12-пульсный выпрямитель, а также обеспечить компенсацию 5 и 7 гармоник тока при работе выпрямителей [3]. К выходам 12-пульсного выпрямителя подключается двухуровневый автономный инвертор напряжения, от которого питается гребной электродвигатель. Размещение дополнительных вторичных обмоток, на пропульсивном трансформаторе, позволяет в составе ПЧ применить трехуровневые автономные инверторы напряжения [4].

Рассмотренная структура ЕЭЭС широко применяется на отечественных судах (например, на танкерах «Михаил Ульянов», «Кирилл Лавров»), а также на зарубежных судах (например, на пароме «Schleswig-Holstein», круизном судне «Norwegian Epic»), благодаря относительной простоте и эффективности обеспечения электромагнитной совместимости СЭД и остальных судовых потребителей.

2. Оценка степени компенсации высших гармоник в ЕЭЭС фирмы «Siemens»

Для оценки качества тока, протекающего в первичной обмотке пропульсивного трансформатора при работе 12-пульсного выпрямителя, проводится компьютерное моделирование. На базе стандартных блоков, содержащихся в пакете Matlab Simulink R2018, разработана модель, структурная схема которой приведена на рисунке 2.

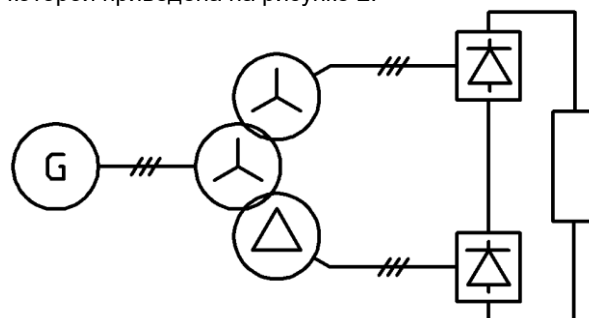


Рис. 2. Структурная схема модели 12-пульсного выпрямителя

В структурной схеме модели по рисунку 2, к идеальному источнику трехфазного тока напряжением 380В и частотой 50Гц подключена первичная обмотка пропульсивного трансформатора соединенная звездой, 2-е вторичные обмотки, соединенные в звезду и треугольник подключены к входам двух трехфазных выпрямителей. Различные соединения вторичных обмоток трансформатора, обеспечивают наличие двух систем трехфазных напряжений сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов, необходимых для работы 12-пульсного выпрямителя. Выходы выпрямителей соединены последовательно и подключены к активной нагрузке. На рисунке 3 представлен гармонический состав тока фазы вторичной обмотки пропульсивного трансформатора, подключенной к 6-пульсному выпрямителю.

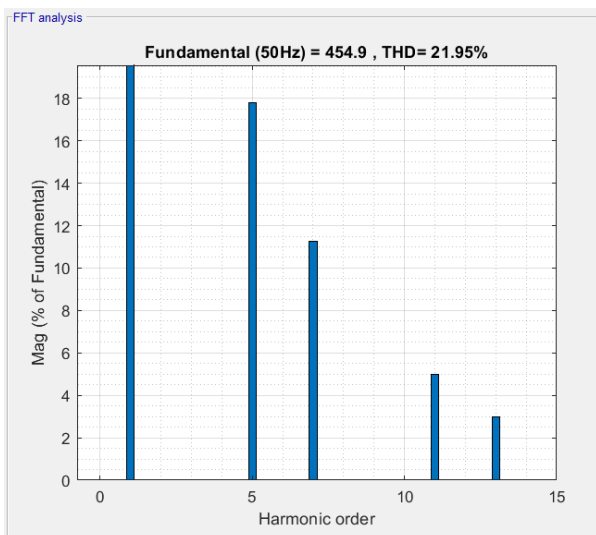


Рис. 3. Гармонический состав тока фазы вторичной обмотки пропульсивного трансформатора

Из рисунка 3 следует, что спектре тока, протекающего в фазах вторичных обмоток пропульсивного трансформатора, содержатся 5, 7, 11 и 13 гармоники тока, создающие значительные искажения формы тока. Коэффициент гармоник (Кг) тока составляет 21,95%. На рисунке 4 представлен гармонический состав тока фазы в первичной обмотке трансформатора.

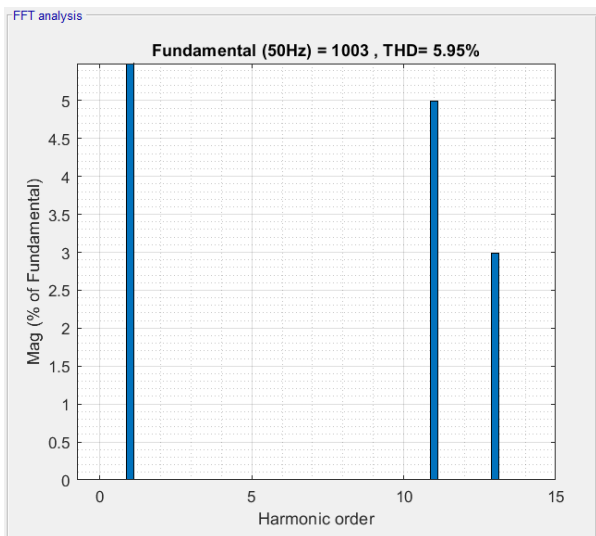


Рис. 4. Гармонический состав тока фазы первичной обмотки пропульсивного трансформатора

Из рисунка 4 следует, что в первичной обмотке пропульсивного трансформатора, 5-я и 7-я гармонические составляющие тока отсутствуют, что объясняется частичной компенсацией гармоник тока в магнитной системе трансформатора. Благодаря наличию сдвига фаз в 30 электрических градусов, 5-я и 7-я гармоники тока, оказываются сдвинутыми друг относительно друга на 150 и 210 электрических градусов соответственно и компенсируют друг друга. Коэффициент гармоник тока в первичной обмотке трансформатора составляет 5,95%, что значительно ниже значения для тока во вторичных обмотках пропульсивного трансформатора [5].

3. Оценка степени компенсации высших гармоник при применении 18-пульсного выпрямителя

В структуре ЕЭЭС фирмы «Siemens» достаточно эффективно осуществляется компенсация 5-й и 7-й гармоник тока в магнитной системе пропульсивного трансформатора. Однако, 11-я и 13-я гармонические составляющие тока никак не компенсируются, и создают искажения формы напряжения в судовой сети. Частично компенсировать гармонические составляющие тока возможно путем применения 18-пульсного выпрямителя в составе преобразователя частоты. На рисунке 5 представлена структурная схема модели 18-пульсного выпрямителя.

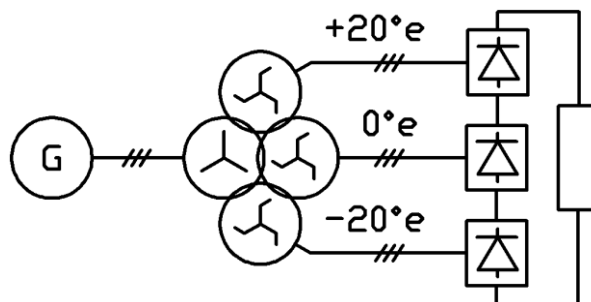


Рис. 5. Структурная схема модели 18-пульсного выпрямителя

В структурной схеме модели по рисунку 5, к идеальному источнику трехфазного тока напряжением 380В и частотой 50Гц подключена первичная обмотка пропульсивного трансформатора соединенная звездой, 3-и вторичные обмотки, соединенные по схеме «зигзаг», имеют сдвиг фаз в +20, 0, -20 электрических градусов и подключены к входам трех трехфазных выпрямителей. Наличие трех систем трехфазных напряжений, сдвинутых друг относительно друга на 20 электрических градусов, является обязательным условием работы 18-пульсного выпрямителя. Выходы выпрямителей соединены последовательно и подключены к активной нагрузке. На рисунке 6 представлен гармонический состав тока фазы первичной обмотки пропульсивного трансформатора.

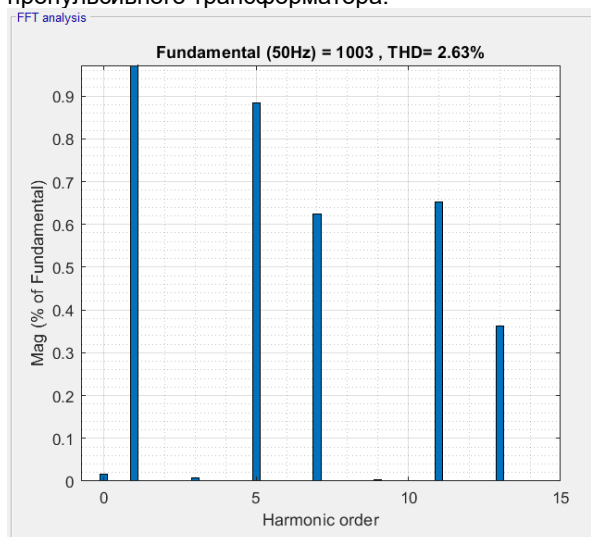


Рис. 6. Гармонический состав тока фазы в первичной обмотке пропульсивного трансформатора

Из рисунка 6 следует, что значение коэффициента гармоник тока в первичной обмотке пропульсивного трансформатора, подключенного к 18-пульсному выпрямителю, составляет 2,63%, что в большей степени позволяет компенсировать гармонические составляющие тока, чем в 12-пульсной схеме выпрямления. Применение 18-пульсного выпрямителя в составе ПЧ СЭД является нецелесообразным, поскольку усложняется конструкция пропульсивного трансформатора, а также исключается возможность применения трехуровневого автономного инвертора напряжения, обеспечивающего более высокое качество тока в гребной электродвигателе.

4. Оценка степени компенсации высших гармоник при применении двух 12-пульсных выпрямителей

Результаты моделирования схемы фирмы «Siemens», а также 18-пульсного выпрямителя показали достаточно хорошую степень компенсации гармонических составляющих тока, возникающих при работе трехфазных выпрямителей. Однако, обе схемы исключают возможность применения и обеспечения высоким качеством напряжения многоуровневых инверторов напряжения, например, трехуровневого автономного инвертора напряжения.

На рисунке 7 представлена структурная схема модели, с двумя гальванически развязанными 12-пульсными выпрямителями, которая дает возможность применения трехуровневого автономного инвертора напряжения, а также обеспечивает более высокую компенсацию гармоник тока, чем в схеме «Siemens».

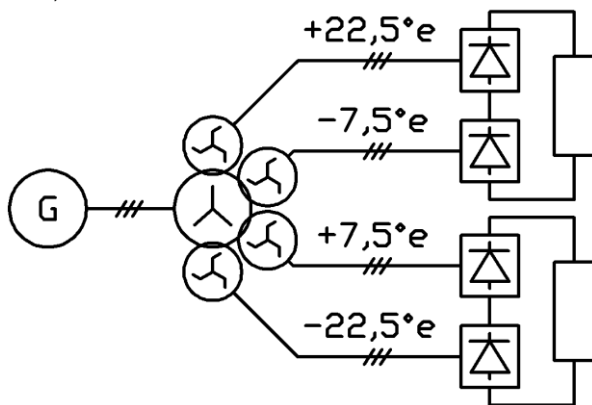


Рис. 7. Структурная схема модели с двумя 12-пульсными выпрямителями

Согласно модели, структурная схема которой представлена на рисунке 7, к идеальному источнику трехфазного тока напряжением 380В и частотой 50Гц подключена первичная обмотка пропульсивного трансформатора соединенная звездой, четыре вторичных обмотки, соединенные по схеме «зигзаг», имеют сдвиг фаз в -22.5, -7.5, +7.5, +22.5 электрических градусов и подключены к входам четырех трехфазных выпрямителей. То есть вторичные обмотки сдвинуты между собой на 15 электрических градусов. К каждому 12-пульсному выпрямителю, состоящему из двух 6-пульсных, подключается пара трехфазных обмоток, напряжения между которыми сдвинуты на 30 электрических градусов. Напряжения между двумя

парами трехфазных обмоток сдвинуты на 15 электрических градусов, что положительно влияет на компенсацию 11-й и 13-й гармонических составляющих тока. На рисунке 8 представлен гармонический состав тока фазы первичной обмотки пропульсивного трансформатора, работающего на два 12-пульсных выпрямителя.

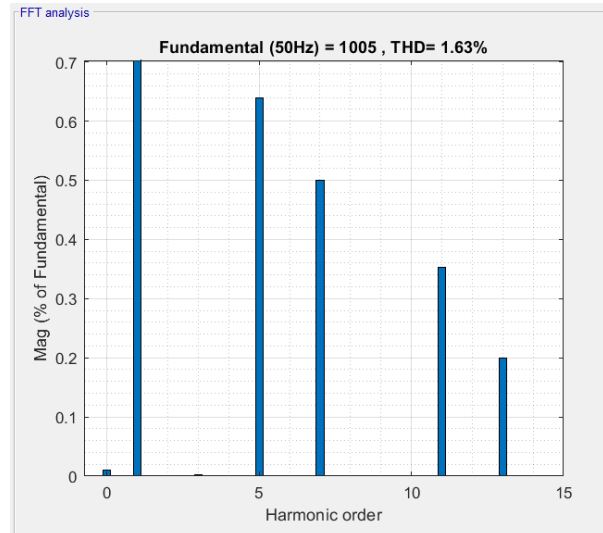


Рис. 8. Гармонический состав тока фазы в первичной обмотке пропульсивного трансформатора

Из рисунка 8 следует, что значение коэффициента гармоник тока в первичной обмотке пропульсивного трансформатора, подключенного к двум 12-пульсным выпрямителям, составляет 1,63%, что является наилучшим показателем степени компенсации гармоник тока из представленных в данной статье результатов. Рассмотренная схема также обеспечивает возможность применения трехуровневого автономного инвертора напряжения в составе преобразователя частоты СЭД.

Выводы

1. Компенсация гармонических составляющих тока в схеме «Siemens», обеспечивается на достаточном уровне. По результатам моделирования, значение коэффициента гармоник тока в первичной обмотке пропульсивного трансформатора составляет 5,95%. Применение пропульсивного трансформатора, с двумя вторичными обмотками, соединенными в звезду и треугольник, позволяет компенсировать в магнитной системе трансформатора 5-ю и 7-ю гармонические составляющие тока. Однако, 11-я и 13-я гармоники тока не компенсируются, и создают искажения формы напряжения в судовой сети.

2. Применение 18-пульсного выпрямителя позволяет в большей степени обеспечить компенсацию 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник тока. Значение коэффициента гармоник тока в первичной обмотке трансформатора составляет 2,63%.

3. Наивысшие показатели по компенсации гармоник тока, а значит и наивысшие показатели по качеству напряжения в судовой сети, обеспечивает схема с двумя 12-пульсными выпрямителями. В основе, которой положен пропульсивный трансформатор, на котором размещены, 4-е трехфазные обмотки, соединенные по схеме

«зигзаг» и смещенные друг относительно друга на 15 электрических градусов. Значение коэффициента гармоник тока в первичной обмотке трансформатора составляет 1,63%. Представленная схема является

оптимальной для применения трехуровневого автономного инвертора напряжения, благодаря наличию двух 12-пульсных выпрямителей с малыми пульсациями выходного напряжения.

Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. Морской регистр судоходства. Часть XI «Электрическое оборудование», СПб, 2019.
2. Патент WO 02/100716, Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor / Iden Stefan, Vaupel Gustav, приоритет 11.06.2001, патентообладатель Siemens AG.
3. Губанов Ю.А., Калинин И.М., Корнев А.С., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. 1(43) Т.1 С. 103-109.
4. Патент РФ № 2683042. Судовая электроэнергетическая установка / Сеньков А.П., Кузнецов В.И., БИ 2019, №9.
5. Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования // Электротехника. 2017. № 12. С. 18-23.

References

1. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Morskoy registr sudokhodstva. Chast' XI «Elektricheskoe oborudovanie» [Rules for the classification and construction of ships. Maritime Register of Shipping. Part XI "Electrical Equipment"], SPb, 2019.
2. Iden Stefan, Vaupel Gustav. Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor. Siemens AG, 11.06.2001. WO 02/100716.
3. Gubanov Yu.A., Kalinin I.M., Kornev A.S., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Napravleniya sovershenstvovaniya sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh system [Directions for improving shipboard unified electric power systems]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. 1(43) T.1 pp. 103-109.
4. Sen'kov A.P., Kuznetsov V.I. Sudovaya elektroenergeticheskaya ustanovka [Marine power plant]. Patent RF № 2683042, 2019.
5. Batrak D.V., Kalinin I.M., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Otsenka kachestva napryazheniya pitaniya v sudovoy elektroenergeticheskoy sisteme metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Evaluation of the quality of the supply voltage in the ship's electric power system by computer simulation]. Elektrotekhnika. 2017. № 12. pp.18-23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Сергеевич Корнев, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: alex_kornev46@mail.ru

Aleksandr S. Kornev, Dr. Sci. (Eng), professor, State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: alex_kornev46@mail.ru

Виктор Иванович Кузнецов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

Viktor I. Kuznetsov, Ph.D. (Eng), research fellow, State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

Ханюй Пань, магистр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: panhangyu12@163.com

Hangyu Pan, master, State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: panhangyu12@163.com

Алексей Петрович Сеньков, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: senkov@smtu.ru

Aleksey P. Sen'kov, Dr. Sci. (Eng), professor, State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: senkov@smtu.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.040

УДК 621.311.21-827

Преобразование энергии ветровых волн в электрическую энергию

А.П. Сеньков¹, А.А. Сеньков¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Экологические проблемы и энергетическая безопасность заставили многие страны обратиться к возобновляемым источникам энергии. В последние десятилетия широкое применение получили солнечные и ветроэлектростанции. Ветровые волны морей и океанов также обладают большими ресурсами экологически чистой энергии. При этом плотность энергии морских волн значительно выше, чем плотность энергии солнечного излучения и ветра, и волны сами несут свою энергию к берегам. Однако попытки практического использования энергии волн для получения электроэнергии стали предприниматься только в последние годы. Построены несколько вариантов опытных волновых электростанций (ВлЭС), например, «Oceanlinx», «Pelamis», «Oyster». Энергия волн имеет две составляющие - потенциальную и кинетическую, которые между собой равны. Эффективность ВлЭС зависит от способности конструкции ВлЭС использовать для преобразования в электрическую энергию и потенциальную энергию, и кинетическую энергию волн. В статье выполнен анализ эффективности различных вариантов опытных ВлЭС. Показано, что большинство из них может преобразовать в электрическую энергию только часть потенциальной энергии волн, а кинетическая энергия волн при этом не используется. Предлагается конструкция ВлЭС способная преобразовать в электрическую энергию и потенциальную, и кинетическую энергию волн. Кроме того, в этой конструкции ВлЭС сложное механическое и электрическое оборудование размещается в воздушной среде, что обеспечит высокую надежность и ресурс.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветровые волны океана, энергия волн, волновые электростанции, эффективность волновых электростанций.

Converting wind wave energy into electrical energy

Aleksey P. Sen'kov¹, Andrew A. Sen'kov¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Environmental problems and energy security have forced many countries to turn to renewable energy sources. In recent decades, solar and wind power plants have been widely used. Wind waves of the seas and oceans also have large resources of clean energy. At the same time, the energy density of sea waves is much higher than the energy density of solar radiation and wind, and the waves themselves carry their energy to the shores. However, attempts to use wave energy for generating electricity have been made only in recent years. Now several versions of experimental wave energy converters (WEC) have been built, for example, "Oceanlinx", "Pelamis", "Oyster". Wave energy has two components-potential and kinetic, which are equal to each other. The efficiency of a WEC depends on the ability of the WEC design to use both potential energy and kinetic energy of waves for conversion to electrical energy. The article analyzes the effectiveness of various variants of experimental WECs. It is shown that most of them can convert only a part of the potential energy of waves into electrical energy, and the kinetic energy of waves is not used. We propose a design of a WEC that can convert both potential and kinetic energy of waves into electrical energy. In addition, in this WEC design, complex mechanical and electrical equipment is placed in the air, which will provide high reliability and resource.

Key words: renewable energy sources, ocean wind waves, wave energy, wave energy converter, efficiency of wave energy converter.

Введение

Экологические проблемы и энергетическая безопасность заставили промышленно развитые страны, нуждающиеся в больших объемах электроэнергии, обратиться к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). К ВИЭ относят энергию рек, ветра, солнца, морей и океанов и геотермальную энергию. Энергия рек для производства электроэнергии используется более ста лет, и стоимость электроэнергии гидроэлектростанций (ГЭС) наиболее низкая. Плотины и водохранилища ГЭС наносят определенный экологический ущерб рекам и окружающей местности, но по сравнению с ущербом экологии, связанным с работой ТЭС, этот ущерб значительно меньше. Однако строительство ГЭС требует больших финансовых вложений и может продолжаться многие годы, а водохранилища вызывают затопление больших территорий. К тому же энергетические ресурсы рек во многих странах отсутствуют или уже используются полностью. Поэтому наиболее интенсивно в последнее

десятилетие развивается электроэнергетика, использующая энергию ветра и солнца, доступные всем государствам мира.

В 2018 году доля ВИЭ в мировом энергетическом балансе увеличилась на 0,8% и составила около 26% [1]. Основной рост доли ВИЭ связан с совершенствованием технологии производства и эксплуатации ветроэлектростанций (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС), получивших широкое распространение в десятках стран. Доля электроэнергии, выработанной ВЭС и СЭС, достигла в 2018 году 7,5%. Это подтверждает прогноз аналитической компании Bloomberg New Energy Finance (BNEF), сделанный в 2017 году, о том, что три четверти инвестиций в электроэнергетику в ближайшие десятилетия пойдут на развитие ВИЭ [2]. При этом прогноз BNEF основывался на темпах роста мощностей именно ВЭС и СЭС.

Но есть и другие виды ВИЭ, энергия которых пока практически не используется. Мировой океан обладает огромными ресурсами различных видов энергии: ветровых волн, течений, приливов,

тепловой. Из этих видов энергии в практической электроэнергетике пока используется лишь небольшая доля энергии приливов. Но в ближайшие годы можно ожидать создания и широкого применения волновых электростанций (ВлЭС).

1. Энергия ветрового волнения океана

Суммарная мощность ветрового волнения поверхности Мирового океана оценивается в 2 ТВт [3, с. 677]. Ветровые волны аккумулируют энергию ветра, но энергия волн более стабильна, чем энергия ветра. В океане с большими глубинами волны могут пройти многие сотни километров и доставить энергию, полученную от далекого шторма, к берегам. Плотность энергии морских волн намного выше, чем плотность энергии солнечного излучения или ветра. Максимальная плотность энергии солнечного излучения в низких широтах Земли около 1 кВт/м². Ветер в рабочем диапазоне скоростей ветра ВЭС имеет плотность энергии сотни ватт на 1 м². Плотность энергии морских волн может достигать десятков киловатт на один метр длины гребня волны.

В закрытых морях России, связанных с океаном узкими проливами, Черном, Балтийском и Белом, а также в Каспийском море, средняя плотность энергии ветровых волн составляет 6-10 кВт/м. В открытых морях - Баренцевом, Беринговом, Охотском и Японском средняя плотность энергии волн составляет от 12 до 44 кВт/м [4]. Конечно, большая часть морей России в зимний период замерзает, но в течение 5-8 месяцев энергию волн этих морей можно использовать для преобразования в электрическую энергию, и получить высокий экономический эффект.

Большие энергетические ресурсы Мирового океана известны давно, однако пока эти ресурсы, в том числе и энергия ветровых волн, почти не используются. Поиск способов преобразования энергии волн в механическую, а затем в электрическую энергию во многих приморских странах занимают десятки лет, существует множество патентов по использованию энергии волн и определенные результаты уже достигнуты. В последние годы появились опытные волновые электростанции (ВлЭС) небольшой мощности: «Oceanlinx», «Pelamis», «Oyster» [5, 6, 7]. Пока ВлЭС имеют слишком большую массу и габариты при относительно небольшой мощности и не могут конкурировать с другими видами электростанций по стоимости электроэнергии, но первый опыт использования энергии волн уже есть.

Во всех вариантах опытных ВлЭС энергия волн сначала каким-либо способом преобразуется в механическую энергию, а затем механическая энергия преобразуется электрическим генератором в электрическую энергию. При этом ключевым моментом, определяющим эффективность ВлЭС, является способ преобразования энергии волны в механическую энергию.

Энергия волн имеет две составляющих – потенциальную и кинетическую [4]. При волнении частицы воды на поверхности совершают колебательное перемещение, при этом поступательное перемещение воды в направлении движения волн очень мало, и при оценке энергии волн им можно пренебречь. На глубокой воде, при глубине водоёма H больше длины волны λ , частицы

воды перемещаются по круговым орбитам (рисунок 1) [8, с. 23].

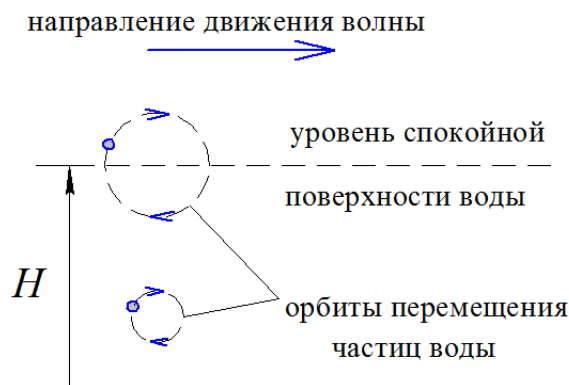


Рис. 1. Орбиты движения частиц воды при волнении

При волнении в круговое движение вовлекаются частицы воды не только на поверхности, но и в глубине. С увеличением глубины амплитуда перемещения частиц воды быстро уменьшается, и на глубине $H = \lambda/2$ амплитуда перемещения частиц воды примерно в 23 раза меньше, чем на поверхности воды [8, с. 22]. Если глубина водоёма $H < \lambda$, траектория движения частиц воды становится эллиптической, при этом большая ось эллипса расположена горизонтально. Во время движения волны вектор скорости перемещения частиц воды, находящихся на гребне волны, направлен в сторону движения волны, а вектор скорости перемещения частиц воды, находящихся в ложбине между волнами, направлен в сторону противоположную движению волны.

Потенциальная энергия волн обусловлена вертикальным перемещением частиц воды относительно среднего уровня. Кинетическая энергия волн связана со скоростью перемещения частиц воды. Потенциальная и кинетическая составляющие общей энергии волн равны между собой [4]. Для эффективной работы ВлЭС необходимо, чтобы конструкция ВлЭС была способна отбирать у волны и потенциальную, и кинетическую энергию. Рассмотрим, каким образом используют энергию волн опытные ВлЭС.

2. ВлЭС «Oceanlinx»

На рисунке 2 показана ВлЭС «Oceanlinx» [5], разработанная специалистами Австралии.



Рис. 2. ВлЭС «Oceanlinx»

Установленный на дне корпус ВлЭС имеет воздушную полость большого объема, открытую со стороны воды. С атмосферой воздушная полость

сообщается через воздуховод, в котором установлена турбина, соединенная валом с ротором электрического генератора. Проходящая под корпусом ВлЭС волна сжимает воздух в полости, и сжатый воздух проходит через воздуховод в атмосферу, заставляя вращаться турбину и ротор генератора. При проходе под корпусом ложбины между волнами давление воздуха в полости снижается, и воздух из атмосферы через воздуховод поступает в полость, опять вращая турбину и ротор генератора. Расчетная мощность «Oceanlinx» – 1 МВт, длина корпуса электростанции составляет 40 м, ширина – 20 м, высота 15 м, масса - 3000 тонн. Реальная мощность оказалась ниже - около 450 кВт.

Давление воздуха в полости «Oceanlinx» и энергия, передаваемая воздухом турбине, зависит от вертикального перемещения уровня воды в полости, то есть ВлЭС «Oceanlinx» использует только потенциальную энергию волны, а кинетическая энергия движения воды не используется. ВлЭС «Oceanlinx» имеет и другие недостатки. Воздух из-за низкой плотности плохой посредник при передаче энергии, поэтому для достижения расчетной мощности нужен большой объем воздушной полости и значительное изменение объема полости при прохождении волн. Вследствие этого масса и габариты ВлЭС очень большие при относительно малой мощности. Кроме того, установка корпуса ВлЭС на дно оказалась не удачной – волны размыли дно под корпусом, и ВлЭС большого веса со временем погрузилась в грунт на несколько метров.

3. ВлЭС «Pelamis»

Расчетная мощность установленной на якоре у берегов Португалии ВлЭС «Pelamis» (рисунок 3) - 750 кВт [6].



Рис. 3. ВлЭС «Pelamis»

Длина второй модификации «Pelamis» составляет 180 м, диаметр - 4 м, масса - 1300 тонн, водоизмещение около 2000 тонн. ВлЭС имеет четыре, соединенных в одну конструкцию цилиндрических поплавка, меняющих на волнах угловое положение относительно друг друга. В сочленениях поплавков находятся гидроцилиндры, которые при изменении углового положения поплавков относительно друг друга нагнетают рабочую жидкость на гидродвигатель, вращающий электрический генератор. Максимального значения

угол между осями соседних поплавков достигает, когда их сочленение находится либо на гребне волны, либо в ложбине между волнами. Как следует из принципа действия, ВлЭС «Pelamis», как и «Oceanlinx», использует только потенциальную энергию волны, поскольку угловое положение поплавков относительно друг друга от скорости движения потоков воды не зависит.

4. ВлЭС «Oyster»

ВлЭС «Oyster» [7] с расчетной мощностью 600 кВт установлена у берегов Шотландии (рисунок 4).

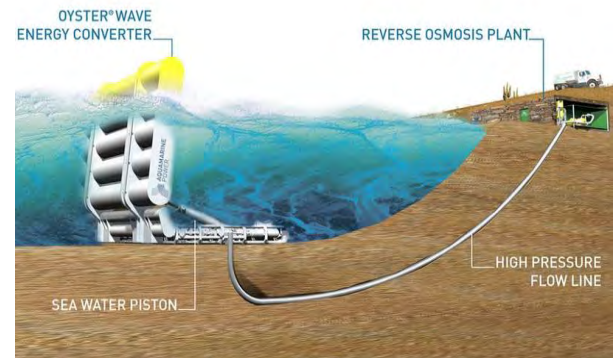


Рис. 4. ВлЭС «Oyster»

Горизонтальное основание ВлЭС закреплено на дне. К основанию шарнирами присоединена одна сторона качающейся аппарели, на которой закреплены несколько цилиндрических понтонов. Аппарель расположена относительно основания под углом, меньшим 90°, и верхняя часть аппарели выступает над поверхностью воды. К основанию прикреплен гидроцилиндр, а шток поршня гидроцилиндра присоединен к аппарели. На рисунке 5 показаны силы, действующие на аппарель.

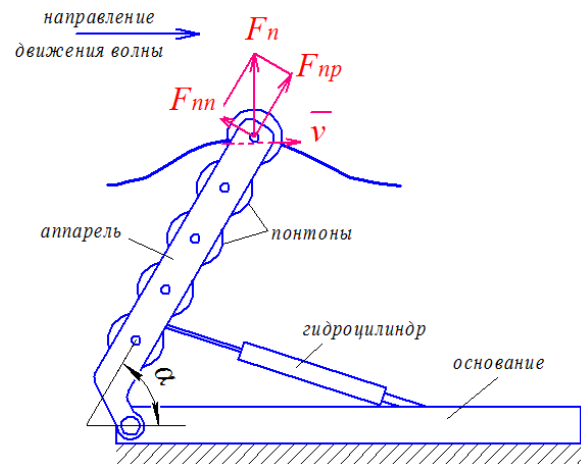


Рис. 5. Силы, действующие на аппарель ВлЭС «Oyster»

Когда над аппарелью проходит волна, за счет потенциальной энергии волны понтоны создают подъемную силу F_n , которая раскладывается на две составляющих: F_{np} - продольную силу, направленную вдоль аппарели, и поперечную силу F_{nn} , направленную поперек аппарели. Сила F_{np} создает механические напряжения в аппарели и основании, но не меняет углового положения аппарели относительно основания. А сила F_{nn}

создает момент, который поворачивает аппарат относительно основания, увеличивая угол α . При увеличении угла α аппарат перемещает поршень гидроцилиндра и нагнетает воду на гидродвигатель, вращающий ротор электрического генератора. Одновременно с увеличением α возрастает потенциальная энергия аппарата.

Если над аппаратом проходит ложбина между гребнями волн, уровень воды над аппаратом понижается, и под действием своего веса аппарат наклоняется. Угол α между аппаратом и основанием, а также потенциальная энергия аппарата уменьшаются. Поршень гидроцилиндра перемещается в обратном направлении, и вновь из гидроцилиндра на берег под давлением нагнетается морская вода, которая вращает гидродвигатель.

Значит в ВлЭС «Oyster» электроэнергия вырабатывается за счет потенциальной энергии волны.

Определим, каким образом на работу ВлЭС «Oyster» влияет кинетическая энергия волны. Как показано на рисунке 1 и рисунке 5, скорость движения v частиц воды в гребне волны направлена в сторону движения волны. Тогда при движении над ВлЭС волны за счет кинетической энергии движущихся частиц воды на аппарат будет действовать сила, направленная по ходу волны, то есть против F_{np} .

Когда над аппаратом будет проходить ложбина волны, уровень воды понижается, под действием своего веса аппарат будет опускаться, и угол α будет уменьшаться. В ложбине направление смещения частиц воды направлено встречно движению волны. Тогда за счет кинетической энергии волны на аппарат будет действовать сила, препятствующая уменьшению угла α .

Анализ принципа действия ВлЭС «Oyster» показывает, что потенциальная и кинетическая энергия волн создают силы, действующие на аппарат в противофазе, снижая эффективность ВлЭС. Таким образом, во всех рассмотренных ВлЭС электроэнергия вырабатывается только за счет потенциальной энергии волн, а кинетическая энергия волн либо не используется, либо гасит часть потенциальной энергии, как это происходит в «Oyster». Кроме того, у «Pelamis» и «Oyster» есть еще один существенный недостаток – конструкция этих ВлЭС практически полностью погружена в морскую воду, что неизбежно сократит ресурс ВлЭС.

5. ВлЭС по патенту РФ №2567916

Однако построить ВлЭС, которая способна использовать и потенциальную, и кинетическую энергию волны возможно. В [9-11] приведено описание ВлЭС, которая является катамараном, поставленным на якорь (рисунок 6).

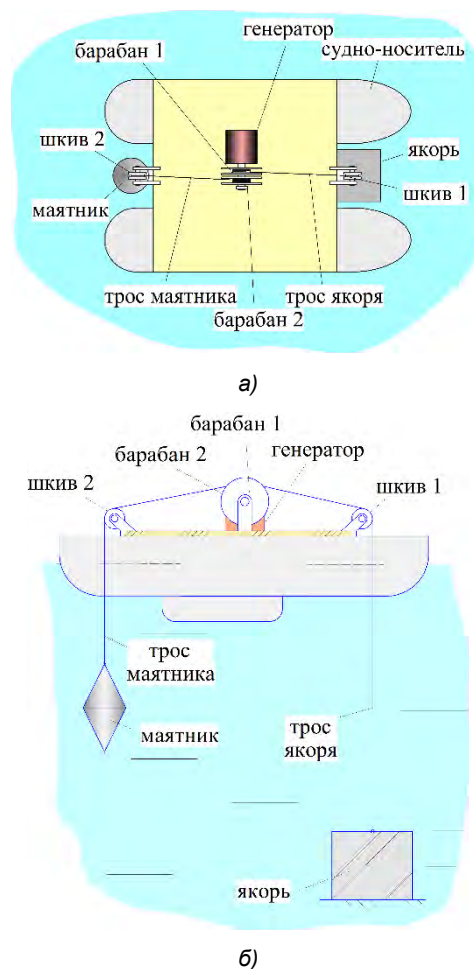


Рис. 6. Схема ВлЭС по патенту РФ №2567916

а – вид сверху; б – сечение между корпусами

На палубе размещаются соединенные общим валом два барабана 1 и 2 и электрический генератор, на носу установлен шкив 1, а на корме шкив 2. Трос (или цепь), намотанный на барабан 1, переброшен через шкив 1 и прикреплен к якорю, поставленному на дно. Трос, намотанный на барабан 2, переброшен через шкив 2 и прикреплен к маятнику, подвешенному в толще воды. Направление намотки тросов на барабаны противоположное. Маятник своим весом создает постоянное натяжение троса. Если волнения моря нет, маятник под действием своего веса будет опускаться, вращая барабан 2 и сматывая с него трос. Вместе с барабаном 2 будут вращаться барабан 1 и ротор генератора. При этом трос якоря будет наматываться на барабан 1, подтягивая катамаран к месту установки якоря. Спуск маятника закончится, когда катамаран будет находиться над якорем, как показано на рис. 6б.

При появлении волнения волны развернут катамаран носовой частью против направления движения волн. При подходе волны (рисунок 7а) носовая часть катамарана под действием силы Архимеда всплывает вверх на гребень волны, и расстояние от шкива 1 до якоря увеличивается.

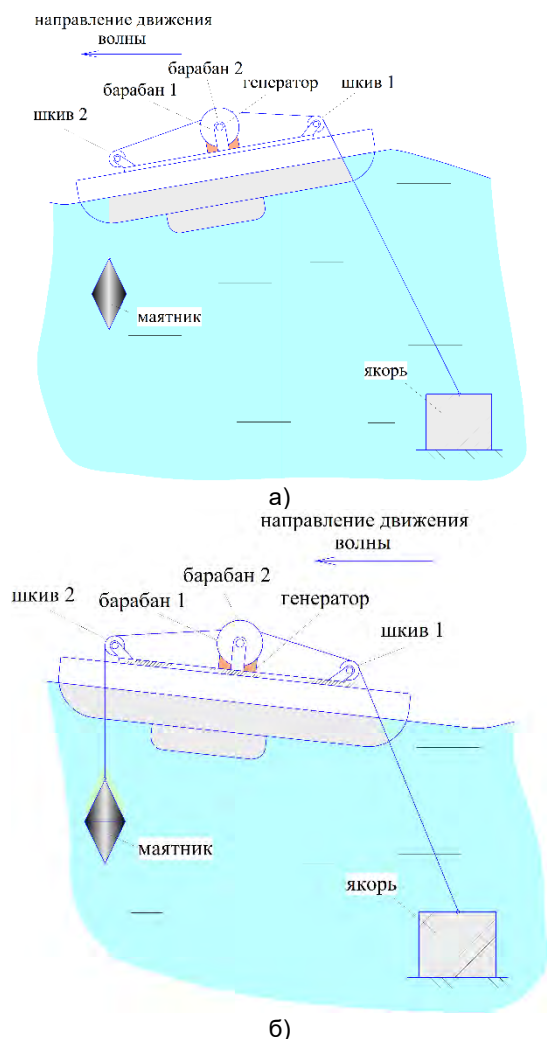


Рис. 7. Работа ВлЭС по патенту РФ №2567916 на волне

а – подъем на волну; б – спуск с волны

Частицы воды в горбе волны двигаются в направлении движения волны (рисунок 1). Это приводит к смещению ВлЭС не только по вертикали, но и в горизонтальном направлении по ходу волны. Значит, расстояние от шкива 1 до якоря увеличивается вследствие смещения корпуса ВлЭС вверх, по вертикали – за счет использования потенциальной энергии волны и по горизонтали – за счет использования кинетической энергии волны. При смещении ВлЭС волной трос, прикрепленный к якорю, сматывается с барабана 1, при этом вращаются оба барабана 1 и 2 и ротор генератора. При вращении барабана 2 трос, прикрепленный к

маятнику, наматывается на барабан 2, поднимая маятник и увеличивая его потенциальную энергию. При вращении ротора генератора преобразуется механическая энергия в электрическую энергию.

При спуске носовой части ВлЭС с горба волны (рисунок 7б) расстояние по вертикали от шкива 1 до якоря уменьшается. Как уже было отмечено, в ложбине между горбами волн возникает смещение воды, направленное против хода волны. Это течение заставляет ВлЭС смещаться в горизонтальном направлении к точке постановки якоря. Натяжение троса, прикрепленного к якорю, уменьшается. Под действием своего веса маятник опускается, сматывая трос с барабана 2. Вместе с барабаном 2 вращается барабан 1, наматывая ослабевший трос якоря, и ротор генератора. При вращении ротора электрический генератор вновь преобразует механическую энергию вращения ротора в электрическую энергию.

Таким образом, в этом варианте исполнения ВлЭС и при подъеме на волну, и при спуске с горба волны используется и потенциальная энергия волны (потенциальная энергия маятника запасена за счет энергии волны), и кинетическая энергия. Еще одно преимущество рассмотренной конструкции ВлЭС заключается в защищенности механического и электрического оборудования от воздействия морской воды и осадков, поскольку это оборудование находится на палубе и в реальной ВлЭС будет защищено надстройкой. В воде находятся элементы способные выдержать агрессивное воздействие морской воды многие годы: корпус катамарана, цепи, якорь и маятник.

Выводы

1. Конструкция опытных ВлЭС «Oceanlinx», «Pelamis», «Oyster» позволяет использовать для преобразования в электрическую энергию только потенциальную энергию волн, кинетическая энергия волн в этих ВлЭС не используется.
2. ВлЭС «Pelamis», «Oyster» во время работы практически полностью погружены в морскую воду, содержащую активные химические вещества, биологические организмы и взвеси, что неизбежно снизит надежность и ресурс ВлЭС.
3. ВлЭС по патенту РФ №2567916 способна использовать и потенциальную, и кинетическую энергию волн, что обеспечивает высокую эффективность электростанции. Все сложное механическое и электрическое оборудование ВлЭС можно разместить в защищенной от воздействия морской воды и осадков палубной надстройке и обеспечить высокий ресурс и надежность ВлЭС.

Литература

1. <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share/>
2. <http://renewnews.ru/bnef-new-energy-outlook-2017/>
3. А. да Роза. Возобновляемые источники энергии /пер. с англ., М.: Издательский дом МЭИ; 2010. – 704 с.
4. Волшаник В.В., Матушевский Г.В. Энергия морских ветровых волн и принципы ее преобразования // Гидротехническое строительство, 1985, №4. – С. 41-45.
5. <https://wiki2.org/en/Oceanlinx>
6. <https://zen.yandex.ru/media/incrediblmech/pelamis-wave-power--morskie-zmei-poedaiuscie-volny-5c0fd439137b3000a989111e>
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Oyster_wave_energy_converter

8. Кадомцев Б.Б., Рыдник В.И. Волны вокруг нас / М.: Знание; 1981. – 152 с.
9. Патент РФ №2513070, Поплавковая волновая электростанция / Калмыков А.Н., Сеньков А.А., Сеньков А.П., 20.04.2014.
10. Патент на изобретение РФ №2567916, Поплавковая волновая электростанция (варианты) / Сеньков А.А., Сеньков А.П., 2015, БИ №31.
11. Сеньков А.П., Калмыков А.Н., Сеньков А.А., Макин П.В. О перспективных вариантах волновых электростанций // Электротехника. 2017. №12, с. 13-17.

References

1. <https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share/>
2. <http://renewnews.ru/bnef-new-energy-outlook-2017/>
3. A. da Rosa Vozobnovlyayemye istochniki energii [Renewable energy sources] trans. с Eng. . М.: Publishing House MEI; 2010. -- 704 p.
4. Volshanik V.V., Matushevskiy G.V. Energiya morskikh vetrovykh voln i printsipy yeye preobrazovaniya [The energy of sea wind waves and the principles of its transformation] Gidroteshnicheskoe stroitelstvo. 1985. №4. pp. 41-45.
5. <https://wiki2.org/en/Oceanlinx>
6. <https://zen.yandex.ru/media/incrediblmech/pelamis-wave-power--morskie-zmei-poedaiuscie-volny-5c0fd439137b3000a989111e>
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Oyster_wave_energy_converter
8. Kadomtsev B.B., Ridnik V.I. Volny vokrug nas [The waves around us]. М.: Znanie, 1981. – pp. 152.
9. Kalmikov A.N., Sen'kov A.P., Sen'kov A.A. Poplavkovaya volnovaya elektrostantsiya [Float wave energy converter]. Patent RF №2513070, 2014.
10. Sen'kov A.P., Sen'kov A.A. Poplavkovaya volnovaya elektrostantsiya [Float wave energy converter]. Patent RF №2567916, 2015.
11. Sen'kov A.P., Kalmikov A.N., Sen'kov A.A., Makin P.V. O perspektivnykh variantakh volnovykh elektrostantsiy [About promising options for wave power converters]. Elektrotehnika. 2017. №12. pp. 13-17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Петрович Сеньков, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: senkov@smtu.ru

Aleksey P. Sen'kov, Dr. Sci. (Eng), professor, State Marine Technical University of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: senkov@smtu.ru

Андрей Алексеевич Сеньков, инженер АО "ЦКБ МТ «Рубин», 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 90, e-mail: norfa@mail.ru

Aleksey P. Sen'kov, engineer, JSC "TSKB MT "Rubin", 191119, ul. Marat, d. 90, St. Petersburg 191119, Russian Federation, e-mail: norfa@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.044

УДК 621.825 (0131)

О возможности использования канатных опор «mamsar» в качестве отдельных или сборных муфт и устройства для определения их жесткости

М.А. Минасян¹, А.М. Минасян¹, Ц. Цзэн¹, Х.Х. Лэ¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация В статье подчеркивается важность муфт являющиеся как весьма ответственных узлов, входящих во многие механизмы и машины, часто определяющих их надежность и долговечность.

Наиболее ценными в статье являются:

1. Выдвинутая гипотеза о возможности использования нетрадиционных стальных канатных виброизолирующих опор в качестве как отдельных, так и сборных виброизолирующих муфт приводов на основе опыта разработки, создания и применения на различных объектах техники опор «MAMSAR». На основе конструктивного обзора и анализа широкого спектра канатных виброизолирующих опор «MAMSAR», в статье представлены некоторые наиболее простые их конструкции в качестве муфт.
2. Представленные оригинальные устройства «MAMSAR» для определения жесткости соответствующих канатных муфт.
3. Практически реализованные канатные муфты и устройства для статических испытаний.
4. Подтверждение выдвинутой гипотезы о возможности использования нетрадиционных стальных канатных виброизолирующих опор в качестве как отдельных, так и сборных виброизолирующих муфт приводов.

Ключевые слова: муфты, канатные муфты, виброизолирующие канатные муфты, устройства для статических испытаний муфт, устройства для определения жесткости муфт.

About the possibility of using "mamsar" rope supports as separate or prefabricated couplings and devices for determining their stiffness

Minas A. Minasyan¹, Armen M. Minasyan¹, Junjie Zeng¹, Ha H. Le¹

¹State marine technical university of Saint-Petersburg

Abstract The article emphasizes the importance of couplings as very important components that are included in many mechanisms and machines, often determining their reliability and durability.

The most valuable in the article are:

1. The proposed hypothesis about the possibility of using non-traditional steel rope vibration-isolating supports as both separate and prefabricated vibration-isolating drive clutches based on the experience of developing, creating and using MAMSAR supports at various facilities. Based on a constructive review and analysis of A wide range of mamsar cable vibration-isolating supports, the article presents some of their simplest designs as couplings.
2. Presented original devices "MAMSAR" for determining the stiffness of the corresponding rope couplings.
3. Practically implemented rope couplings and devices for static testing.
4. Confirmation of the proposed hypothesis about the possibility of using non-traditional steel rope vibration-isolating supports as both separate and prefabricated vibration-isolating drive clutches.

Key words: couplings, rope couplings, anti-vibration mounts of the cable coupling device for static tests of joints, the device for determining the stiffness of the couplings.

Введение

Разнообразие задач, решаемых с помощью муфт, и требований, предъявляемых к ним в соответствии с условиями эксплуатации машин и агрегатов, в состав которых входят муфты, привело к созданию широкого спектра. Все это вместе взятое является основанием актуальной задачи постоянного их усовершенствования и развития. В связи с этим возникла необходимость публикации статьи о нетрадиционных, новых и малоизвестных еще недостаточно освещавшихся в литературе канатных виброизолирующих муфтах.

Обзором отечественных и зарубежных литературных источников выявлено ограниченное количество запатентованных муфт с упругим элементом из стального каната.

Актуальность рассматриваемого вопроса - возможности использования запатентованных канатных опор «MAMSAR» в качестве отдельных или сборных муфт и способы определения их жесткости, является очевидной поскольку как отмечалось выше муфты являются ответственными

узлами, часто определяющими надежность и долговечность всей машины.

Целью статьи является изложение выдвинутой гипотезы о возможности использования нетрадиционных стальных канатных виброизолирующих опор в качестве как отдельных, так и сборных виброизолирующих муфт приводов.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Обосновать целесообразность и представить некоторые наиболее простые виброизолирующие опоры, в качестве муфт приводов, на основе конструктивного обзора и анализа широкого спектра канатных виброизолирующих опор «MAMSAR».
2. Обосновать и представить оригинальные устройства «MAMSAR» для определения жесткости соответствующих канатных муфт.
3. Намечить планы будущих исследований и представить интерес научной общественности к данной проблематике.

1. Муфты приводов, обладающие малым крутящим моментом

Краткая характеристика конструктивных особенностей виброизолирующих канатных муфт, представленных на рис. 1, заключается в следующем.

Рис.1а- ведущий и ведомый фланцы с петлеудерживающими элементами, упругий элемент из непрерывного стального каната, соединяющий фланцы поочередным плетением с образованием петель упомянутого стального каната и фиксацией стального каната в петлеудерживающих элементах.

Рис. 1б-муфта содержит тороидальный упругий элемент из стального каната, ведущий и ведомый фланцы с его прижимными элементами.

Рис. 1с-муфта содержит упругий элемент из троса, навитый по спирали, фланцы, установленные на витках спирали с наружной и внутренней сторон в диаметрально противоположных точках окружности витков, при этом образованная витками троса внутренняя торообразная полость заполнена дополнительным тросовым упругим элементом из аналогичного материала и витки основного тросового упругого элемента охватывают витки дополнительного тросового упругого элемента. За счет увеличения потерь на трение, обеспечиваемое как выбором материала с большим внутренним трением, так и конструктивной особенностью муфты достигается повышение эффективности виброизоляции.

Рис. 1д. Упругий виброизолирующий элемент муфты содержит упругий элемент, выполненный в виде спирали из стального каната, витки которого пропущены через отверстия фланцев, дополнительный упругий элемент, выполненный, по крайней мере, из одного отрезка троса, переплетенного, по крайней мере один раз в вертикальной плоскости виброизолирующего элемента перпендикулярно полувиткам основного упругого элемента. Также дополнительный упругий элемент может быть уложен, по крайней мере, в два ряда и переплетен с основным упругим элементом, или с одинаковым огибанием полувитков каната основного упругого элемента, или с восьмеркообразным огибанием полувитков каната основного упругого элемента.



Рис. 1- Муфты приводов, обладающие малым крутящим моментом.

Рис. 1е-муфта отличается от муфты представленной на рис. 1с тем, что дополнительным упругим элементом является резина, выполненная в виде тора.

Подробные сведения о канатных виброизолирующих опорах «MAMSAR», которые могут использоваться, в том числе в качестве муфт приводов, обладающие в основном малым крутящим моментом, представлены в [1, 3-8, 10, 11].

2. Упругие виброизолирующие элементы сборных муфт

Представленные на рис. 2 упругие виброизолирующие элементы «MAMSAR» могут быть использованы преимущественно для сборных муфт, а на рис. 1 помимо использования в отдельности можно также использовать и в качестве сборных муфт, например представленных на рис. 3 [9]. В них присоединительные элементы выполнены в виде фланцев или колец, а упругие стальные канатные элементы по спирали образуют: торообразную форму; пилообразную формы; гиперболообразную форму с отдельными полукруглыми отрезками каната и т.п. Это позволяет создавать разнообразные конструкции сборных муфт с максимальным крутящим моментом и коэффициентом эффективности вибрационной защиты [9].

Рис. 2с,d- Упругий виброизолирующий элемент сборной муфты содержит упругий элемент, выполненный в виде спирали из стального каната, витки которого пропущены через отверстия опорных планок, дополнительный упругий элемент, выполненный, по крайней мере, из одного отрезка троса, переплетенного, по крайней мере один раз в горизонтальной плоскости виброизолирующего элемента перпендикулярно полувиткам основного упругого элемента. Далее аналогично рис. 1 d.

Рис. 2а- Цилиндрический упругий виброизолирующий элемент содержит упругий элемент в виде стального каната, первую и вторую металлическую пластины с отверстиями, через которые проходят витки упругого элемента. Металлические пластины выполнены монолитными, а витки упругого элемента в их цилиндрических отверстиях зафиксированы или литем, или сваркой, или прессованием.

Рис. 2б, е- Цилиндрические упругие виброизолирующие элементы содержат упругий элемент в виде стального каната, наружные первую и вторую металлическую пластины с соответствующими внутренними прижимными пластинами. Между наружными и внутренними пластинами выполнены поперечные полукруглые пазы для прохода витков упругого канатного элемента. Между канавками предусмотрены вертикальные отверстия для фиксации витков упругого канатного элемента крепёжными элементами, например, винтами.

Рис. 2f- Цилиндрические упругие виброизолирующие элементы содержат наружные первую и вторую металлическую пластины Т-образной формы с двумя соответствующими внутренними прижимными пластинами, упругие элементы из непрерывного стального каната, соединяющие справа и слева верхние и нижние пластины поочередным плетением с образованием петель упомянутого стального каната и фиксацией стального каната в петлеудерживающих элементах.

Рис. 2g - Упругий виброизолирующий элемент отличается от Рис. 2f, формами наружных первого и

второго металлических пластин соответствующими внутренними прижимными пластинами. Кроме того, здесь упругий канатный элемент выполнен из одного непрерывного куска, соединяющие по всему периметру верхние и нижние пластины поочередным плетением с образованием петель упомянутого стального каната и фиксации стального каната в петледерживающих элементах.

Рис. 2h,i,j,k- Цилиндрические упругие виброизолирующие элементы конструктивно отличаются от рис. 2f, тем, что в них рассмотрены дополнительные упругие элементы, т.е. вулканизированный упругий элемент (Рис. 2h), пневматический баллон (Рис. 2i,j,k).



Рис. 2. Упругие виброизолирующие элементы сборных муфт

На рис. 3a,d,f представлены опытные образцы цельных муфт, а на рис. 3b, c, e – примеры моделей сборных муфт на основе применения отдельных одинаковых виброизолирующих элементов, закрепленных с равномерным расположением по окружности к ведущему и ведомому фланцам муфты (рис. 3) [9]. Представленные на рис. 3 канатные муфты в 2016 году на XXI Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД» решением Экспертной комиссии и Международного Жюри Салона удостоены золотой медали.



Рис. 3. Опытные образцы отдельных (a, d, f) и сборных (b, c, e) виброизолирующих муфт приводов

3. Средства для статических испытаний муфт

Для экспериментального определения жесткости муфты ее нагружают скручивающим моментом и посредством какого-либо устройства фиксируют ее угловую деформацию. Зависимость $C = f(\phi, M)$ изображается на графике $(\phi - M)$. [12]. Так как данные, соответствующие процессам нагружения и разгрузки, не совпадают, то на этом графике получается замкнутая кривая – петля гистерезиса. Каждому значению M здесь отвечают два значения ϕ . Отложив на том же графике точки $\phi_{cp} = 1/2(\phi_{max} +$

$\phi_{min})$ через них проведем кривую, которая (для линейных соединений) оказывается близкой к прямой. Тангенс угла наклона этой линии к координатной оси M выражает жесткость муфты (рис. 4).

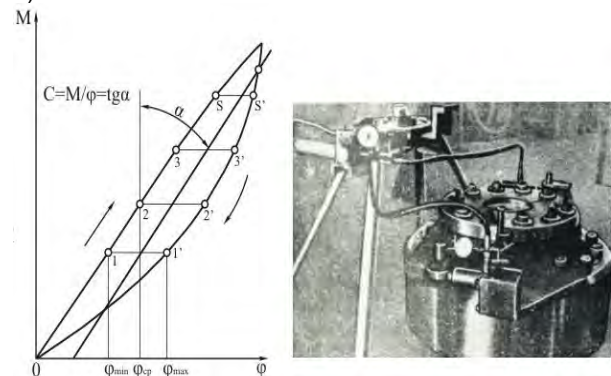


Рис. 4 – Экспериментальное определение жесткости муфт

Регистрация угла скручивания производится с помощью индикаторов или оптическим способом по углу отклонения луча, отраженного от зеркала, укрепленного на детали, а также другими известными способами.

Податливость муфты с ростом нагрузки уменьшается незначительно, поэтому в расчетах муфт обычно применяется постоянная.

Статическую силовую характеристику и крутильную жесткость муфт и виброизоляторов, особенно резиновых, тросовых, металлической сетчатой структуры (МР) и т.д. определяют предпочтительно при постоянной скорости деформирования от 1 до 15 мм/мин [13].

Обеспечить указанное требование на известных устройствах невозможно из-за способа нагружения скручивающим моментом с помощью подвески с гирями, т.к. полученные при этом результаты будут весьма приближенными.

С другой стороны точка приложения подвески с гирями относительно неподвижной точки в средней части коромысла смещена, т.е. механизм является несимметричным, и поэтому известное устройство не обеспечивает возможность использования в качестве прикладываемой силы испытательной машины. В противном случае упругий элемент помимо деформации скручивания подвергается изгибу, искажая, таким образом, реальную характеристику крутильной жесткости. Кроме того, в испытательных машинах захваты для крепления образца или устройства расположены несимметрично, и при растягивающих или сжимающих усилиях захваты должны воспринимать их без перекосов и изгибов. Таким образом, известное устройство не обеспечивает достаточную точность определения характеристик муфты и не обладает универсальностью.

Серийно выпускаемых устройств (присоединения, стенды, установки и т.д.) для испытания муфт не существует. Соответствующие конструкции для испытания опытных образцов разрабатываются каждой фирмой индивидуально применительно к конкретным типам муфт.

Для обеспечения точности определения жесткости канатных муфт разработаны оригинальные средства «MAMSAR» [1,2].

При создании опытных образцов виброизолирующих муфт <<MAMSAR>> были разработаны и созданы специальные устройства и стенды для их испытания, проведения экспериментальной оценки их работоспособности и эффективности в лабораторных условиях.

Одно из предлагаемых устройств испытания упругих муфт (рис. 5) имеет ряд преимуществ перед типовыми испытательными машинами, выражающиеся [1]:

- в повышении точности определения характеристик упругих муфт (нагрузочной характеристики (скручивающий момент - угловая деформация), номинальной статической нагрузки муфты, коэффициентов рассеяния и демпфирования);

- в универсальности применения устройства для широкого спектра типоразмеров муфт;

- в возможности применения различных технических средств для передачи скручивающего момента муфте (испытательной машины на растяжение и сжатие, подвески с гирями, домкрата и т.д.).

Эти преимущества были достигнуты следующими способами:

- использование Т-образной пластины с боковыми накладками вместо прямолинейного рычага, для приложения усилия на муфту позволило при получении скручивающего момента избежать изгиба оси муфты. Использование в качестве одной из опор крепления муфты подшипникового узла позволило снизить силу трения между подвижным - поворотным фланцем муфты и опорой. Эти технические решения обеспечили необходимую точность в получении характеристик муфты.

- применение Т-образной пластины с подвижными боковыми накладками позволяют крепить муфты с различными габаритными размерами. При этом высота опоры принимается равной $(3 - 20)d$, где d - диаметр вала муфты. Крепление к проушине Т-образной пластины разнообразных захватов или опор позволяет для передачи усилия муфте использовать различные механизмы (испытательные машины на растяжение и сжатие, подвески с гирями, домкрата и т.д.).

На рисунке 5 изображены виды устройства. Устройство для испытания упругих муфт содержит основание 1, две передвигаемые опоры 2, 3, испытываемую муфту 4, составной вильчатый механизм 5, средство 6, 7, непосредственно обеспечивающее места прикладываемой силы.

Основание 1 выполнено с пазы А, которые обеспечивают крепление опор 2, 3 крепежными средствами 8 на различных расстояниях В друг от друга в зависимости от ширины или толщины. С испытываемой муфты 4. Кроме того, на основании предусмотрено также отверстие 6 для возможности приложения по оси Z силы. Передвигаемая опора 2 состоит из стойки 9 с лапой 10 и крепежными средствами 8.

Внутри опоры 2 размещено центрирующее средство, которое с одной стороны предотвращает изгиб одного из фланцев (например, ведущего 11), а с другой стороны обеспечивает беспрепятственный поворот, т.е. угловое перемещение относительно оси ОХ.

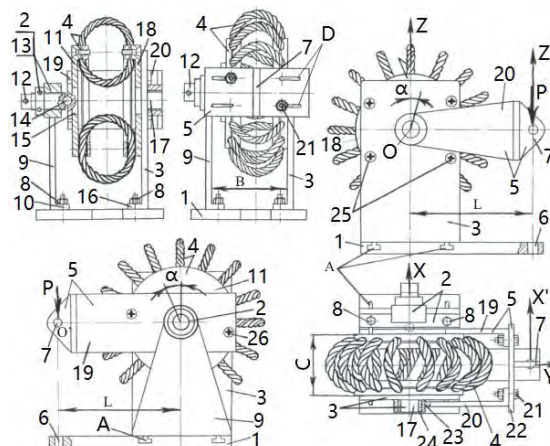


Рис. 5 – Устройство для испытания муфт

1 – основание; 2, 3 – передвигаемые опоры; 4 – муфта; 5 – составной вильчатый механизм; 6 – отверстие; 7 – Т-образная деталь вильчатого механизма; 8 – крепежные средства; 9 – стойка; 10 – лапа; 11, 18 – фланцы; 12 – шпилька (болт); 13 – контргайка; 14 – шарик; 15 – промежуточный элемент; 16 – лапа; 17 – цапфа; 19, 20 – щеки; 21, 22, 25, 26 – крепежные средства; 23 – проушина; 24 – подшипник; А – пазы; В – расстояние между опор; С – толщина испытываемой муфты; L – плечо

Центрирующее устройство может быть в виде узла, состоящего из шпильки или болта 12 с контргайкой 13 и шариком 14. На торце болта 12 выполнено шарообразное углубление для шарика 14. Соответствующее углубление выполняется и на ведущем фланце 11 либо непосредственно, либо через промежуточный элемент 15, если фланец выполнен с центральным отверстием. Можно использовать в качестве центрирующего устройства конус или центр другой конструкции, т.е. любое устройство, обеспечивающее поворот или угловое перемещение одного фланца относительно другого без сгиба.

Опора 3 состоит из лапы 16 и цапфы (хвостовика) 17. К опоре 3 неподвижно крепится второй, например, ведомый фланец муфты 18. Таким образом, опора 3 предназначена для фиксации второй - ведомой части 18 муфты, а цапфа (хвостовик) 16 служит опорой для обеспечения работы составного вильчатого механизма 5.

Составной вильчатый механизм 5 состоит из двух щек 19 и 20 со средствами крепления 21 к кронштейну 22. Кронштейн 22 в центральной части имеет проушину - отверстие 6 для обеспечения точки приложения прикладываемой силы, а справа и слева предусмотрены пазы D. Пазы D предназначены для обеспечения возможности испытания муфт различных типоразмеров, т.е. в зависимости от ширины или толщины С.

Щека 19 с одной стороны крепится к кронштейну 22, а с другой - к одному из фланцев, например, ведущему 11. Щека 20 также с одной стороны крепится к кронштейну 22, а с другой стороны имеет

проушину 23 с подшипником 24. Подшипник 24 устанавливается на цапфу 17 стойки 3.

Таким образом, щека 19 с кронштейном 22 создает крутящий момент на фланце 11 муфты, а щека 20 при этом благодаря подшипниковому узлу (т.е. цапфы 17, стойки 3 и подшипника 24) с одной стороны предотвращает возникновение изгибающей силы, а с другой обеспечивает беспрепятственный поворот всего вильчатого механизма 5. В противном случае (без второй щеки 20) от прикладываемой силы через отверстие 6 к Т-образной детали вильчатого механизма 7 одновременно с крутящим моментом возникает и изгибающий момент.

Причиной возникновения изгибающего момента является несимметричность конструкции - узлов 19, 5, 7. При этом фланец 11 отклоняется относительно вертикальной плоскости OZY. Поэтому наличие второй щеки 20 в механизме имеет существенное значение.

Для испытания муфты производится сборка устройства, вильчатый механизм закрепляют с подвижным и неподвижным захватами испытательной машины.

Испытание упругой муфты на предлагаемом устройстве производят следующим образом. В зависимости от конкретных типов испытываемых муфт и заданных значений угловой деформации α выбираются дискретность опытов и величина максимального крутящего момента. Учитывая, что динамометр испытательной машины показывает значение силы P , то умножая ее на плечо L , получают значения соответствующего момента.

Под воздействием силы P происходит поворот на угол α только ведущего фланца 11 муфты 4, так как ведомый фланец 18 закреплен крепежными средствами 25 к опоре 3.

Крутящий момент на фланце 11 возникает через проушину и щеку 19, которая закреплена крепежными средствами 26 с фланцем 11. При этом вторая щека 20 совершает свободный поворот вокруг цапфы 17, обеспечивая тем самым только крутильную деформацию упругих элементов муфты 4.

Цапфа 17 может быть выполнена также с подшипником внутри опоры 3, т.е. подвижной. Подшипники, применяемые в устройстве, могут быть любого типа (качения, скольжения, игольчатые и т.д.).

Таким образом, представленная кинематическая схема устройства обеспечивает повышение точности определения характеристик упругих муфт (номинальной нагрузки, коэффициентов рассеяния и демпфирования и т.д.) и универсальность, как по возможности применения различных средств нагружения и вариантов использования мест прикладываемой силы, так и испытания муфт различных типоразмеров.

Новизна данного устройства заключается в том, что испытательные устройства, применяемые в настоящее время, не позволяют достичь той точности определения характеристик упругих муфт, какой обладает данная конструкция.

На рисунках 6, 7 представлено второе устройство для определения крутильной жесткости муфт и виброизоляторов [2].

Устройство состоит из общего основания 1, трех опор, одна – неподвижная центральная подшипниковая 2 и две – боковые 3, 4, двух специальных составных рычагов 5, 6, двух серег 7, 8, коромысла 9, средств 10, 11 крепления мест прикладываемых сил к захватам испытательной машины, двух испытываемых муфт 12, 13, состоящих из опорных планок или пластин 14, 15 с упругим элементом, элементов крепления 16, 17 опор 2, 3, 4 к общему основанию 1, элементов крепления 18, 19, 20, 21 и установки муфт 12, 13 в устройстве, элементов 22, 23, выполненных в виде пластин и шайб, регулирующих расстояние между боковыми опорами 3, 4, обеспечивающих испытание муфт 12, 13 других типоразмеров.

Составные рычаги 5, 6 состоят из двух частей, а именно из самих рычагов 5, 6 и полукруглых дисков 24, 25, соединенных между собой ступенчато с помощью промежуточных втулок 26 и крепежных средств 27, 28. С другой стороны, диски 24, 25 винтами 29 закреплены к соответствующим "опорно-подвижным" планкам 15 виброизоляторов 12, 13.

Центральная подшипниковая опора 2 выполнена с отверстием, где установлены предпочтительно два подшипника качения 30, 31, в отверстиях которых устанавливается гладкая часть осей 18, 19, резьбовая часть которых заворачивается в резьбовые отверстия "подвижных" планок 15 муфт 12, 13. Крепление "неподвижных" планок 14 муфт 12, 13 производится к боковым

опорам 3, 4 неподвижно с помощью болтов 20, 21 с фиксацией от проворачивания штифтами (на рисунках не показано).

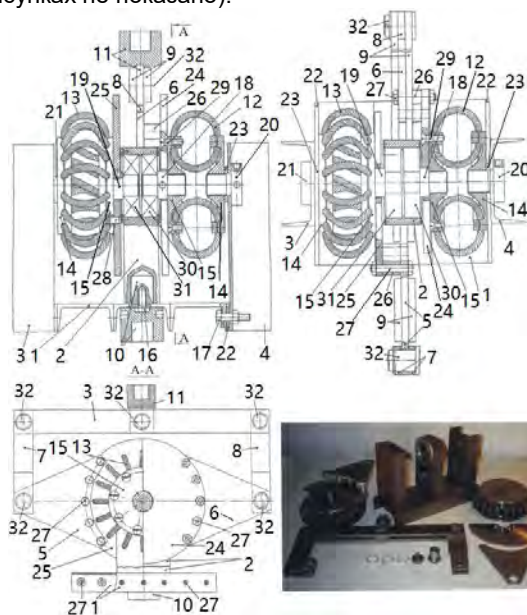


Рис. 6 – Устройство для определения крутильных колебаний

1 – общее основание устройства; 2 – неподвижная центральная подшипниковая опора; 3, 4 – боковые опоры; 5, 6 – специальные составные рычаги; 7, 8 – серги; 9 – коромысло; 10, 11 – средства крепления мест прикладываемых сил к захватам испытательной машины; 12, 13 – испытываемые муфты (виброизоляторы); 14 – «неподвижная» опорная планка муфты (виброизолятора); 15 – «подвижная» опорная планка муфты (виброизолятора); 16 – крепежное средство

неподвижной центральной подшипниковой опоры; 2, 17 – крепежное средство боковых опор 3, 4; 18, 19 – оси специальные; 20, 21 – болты; 22 – регулировочная пластина; 23 – регулировочная шайба; 24, 25 – полукруглые диски рычагов 5, 6; 26 – промежуточная втулка; 27 – крепежное болтовое соединение; 28 – штифт; 29 – винт; 30, 31 – подшипники качения; 32 – ось

Продольное перемещение боковых опор 3, 4 обеспечивается также пазами, выполненными или на общем основании 1, или на боковых опорах 3, 4 в предварительно предусмотренных дополнительных площадках с применением крепежных средств (на рисунках не показаны).

Крепление элементов 5 и 7, 7 и 9, 9 и 11, 6 и 8, 8 и 9 осуществляется с помощью осей 32.

Допускается также, вместо подшипников качения 30, 31, применение подшипников скольжения или просто отверстий с хорошо обработанной поверхностью. При этом перед испытанием достаточно смазать отверстия осей 18, 19.

Работа устройства заключается в следующем. Устройство в сборе с двумя образцами испытуемых муфт 12, 13 устанавливают между захватами и колоннами универсальной испытательной машины, например, марки УМ-5 или УММ-5, а затем производят крепление элементов 10 и 11 к соответствующим захватам испытательной машины.

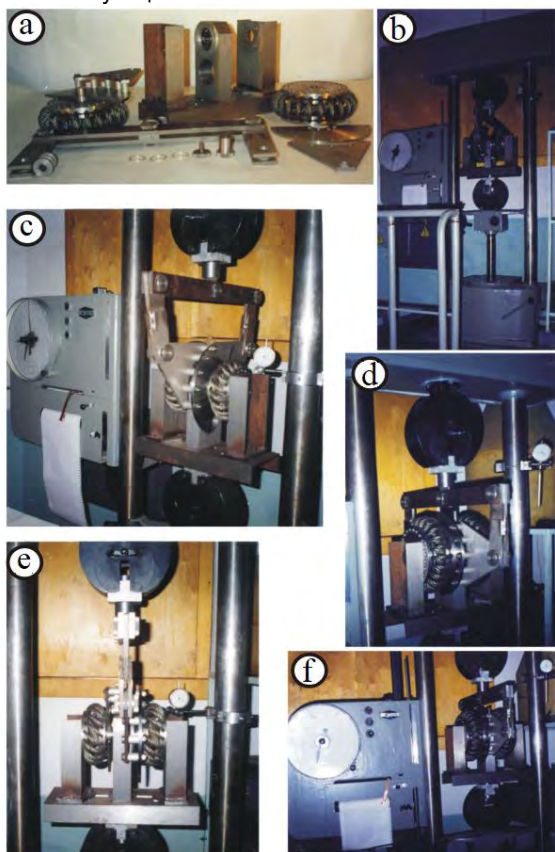


Рис. 7 – Устройство для определения крутильной жесткости муфт и виброизоляторов на испытательной машине УММ – 5
а – детали устройства с муфтами (виброизоляторами); б – ф – общие виды устройства и испытательной машины

Выбирается значение максимальной силы и с учетом плеч рычагов 5, 24, 6, 25 определяется заданный максимальный момент скручивания

упругого элемента муфт 12, 13, а также соответствующее значение угла закручивания или поворота.

Определяют необходимое количество замеров с определенной дискретностью прикладываемого усилия от 0 до максимального значения.

Запускается испытательная машина для режима ручного или автоматического управления. При этом сначала производится ступенчатое с выбранным шагом нагружение муфт (виброизоляторов) 12, 13 с регистрацией прикладываемого усилия (момента) и соответствующего угла скручивания, а затем в обратной последовательности ступенчатое их разгружение с регистрацией тех же параметров.

По полученным значениям строят восходящую и нисходящую ветви кривой "момент – угловая деформация" (рис. 4). Так как данные, соответствующие процессам нагружения и разгружения, не совпадают, то графическое изображение представляет из себя замкнутую кривую – петлю гистерезиса.

Каждому значению скручивающего момента отвечают два значения угла скручивания. Определив средние точки углов скручивания, через них проводят кривую, которая (для линейных муфт) оказывается близкой к прямой. Тангенс угла наклона этой линии к координатной оси скручивающего момента выражает крутильную жесткость виброизолятора.

Однако для стабилизации упругодемпфирующих характеристик испытания муфт следует производить не менее трех циклов. Устройство обеспечивает испытание любых типов муфт (виброизоляторов) на кручение, для чего на полукруглых пластинах 24, 25 высверливаются соответствующие отверстия для крепления, а по высоте регулируются, например, пластинами 22 и шайбами 23.

Новизна конструкции установки заключается в следующем: прикладываемым усилием является испытательная машина на растяжение – сжатие, подвеска с гирями или ручное нагружение; механизм преобразования прикладываемой силы в скручивающий момент, действующий на испытываемую муфту. Механизм преобразования выполнен в виде симметричной конструкции, состоящей из трех опор. Первая опора – неподвижная центральная подшипниковая 2 и две, остальные – продольно передвигаемые боковые 3, 4, установленные на общем основании 1. Между продольно передвигаемыми боковыми опорами устанавливаются по одной муфте (виброизолятору) 12, 13. Крепление "неподвижных" планок 14 муфт (виброизоляторов) со стороны боковых опор 3, 4 является неподвижным и осуществляется крепежными средствами 20, 21. Крепление "подвижных" планок 15 муфт 12, 13 к полукруглым дискам рычагов 24, 25 допускает их поворот без изгиба относительно осей 18, 19. Оси 18, 19 выполнены с резьбой под отверстия "подвижных" планок 15 с одной стороны, а с другой стороны гладкими - под подшипники 30, 31. Резьбовой стакан 11 соединенный с общим коромыслом 9 передает прикладываемое на него усилие подвижным планкам 15 муфт 12, 13 через серьи 7, 8. Усилие, воспринимаемое подвижными планками 15, преобразуется в скручивающийся момент, который передается упругим элементам муфт 12, 13. В зависимости от прилагаемой нагрузки подвижная

часть муфты поворачивается на определенный угол. Тангенс угла поворота равен крутильной жесткости муфты. Продольное перемещение боковых опор 3, 4 обеспечивается с помощью регулируемых пластин 22 и шайб 23, установленных между торцевыми плоскостями общего основания 1 и вертикально поперечными плоскостями опор 3, 4 с применением крепежных деталей.

Заключение

В статье представлены реализованные опытные образцы оригинальных канатных виброизолирующих опор в качестве как отдельных, так и сборных виброизолирующих муфт приводов, а также устройства для определения их жесткости.

Изложено подтверждение выдвинутой гипотезы о возможности использования нетрадиционных стальных канатных виброизолирующих опор в

качестве как отдельных, так и сборных виброизолирующих муфт приводов.

В настоящее время идет подготовка к исследованию коэффициента эффективности вибрационной защиты опытного образца канатной муфты на специально разработанной экспериментальной установке на базе дизель-генераторного агрегата ДГА-8 с приводным дизелем 2Ч 8,5/11 в лаборатории кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок СПбГМТУ.

В дальнейшем планируются исследования вибрации ДГА-8 с элементами систем опорной и неопорной амортизации.

Можно утверждать, что создание новых не традиционных виброизолирующих канатных муфт приводов возможно.

Литература

1. Каталог X Московского международного Салона промышленной собственности «АРХИМЕД». Часть I. Виброизоляторы корабельных технических средств. Сборный виброизолятор. Устройство для определения крутильной жесткости виброизоляторов. «Центр содействия развитию изобретательства и рационализации ВОИР». М. 2007.-407с. (с. 1127, 129). Часть I I. Виброизолирующее устройство. 144с. (с. 51).
2. Каталог XI Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». Виброизоляторы. Сборный виброизолятор. Устройство для определения крутильной жесткости виброизоляторов. «Центр содействия развитию изобретательства и рационализации ВОИР». М. 2008.-438с. (с. 145, 174).
3. Каталог XII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». Часть I. Виброизолирующее устройство. Виброизоляторы. «Центр содействия развитию изобретательства и рационализации ВОИР». М. 2009.-438с. (с. 38, 130).
4. Каталог XIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». Часть I. Виброизолирующие устройства. «Центр содействия развитию изобретательства и рационализации ВОИР». М. 2010.-256с. (с. 69).
5. Электронный Каталог XIV Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 01-04 апреля 2011 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.inovexpo.ru. www.mosvoir.ru.
6. Электронный Каталог XV Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 20-23 марта 2012 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.inovexpo.ru.
7. Электронный Каталог XVII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 01-04 апреля 2014 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.inovexpo.ru.
8. Электронный Каталог XVIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 02-05 апреля 2015 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
9. Электронный Каталог XIX Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 29 марта-1 апреля 2016 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
10. Электронный Каталог XX Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 5-8 апреля 2017 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
11. Электронный Каталог XXI Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД». 5-8 апреля 2018 года. Россия, Москва, ЭкоЦентр «Сокольники». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
12. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС. Л.; "Судостроение", 1968..с.43,рис.14а.
13. Беляковский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах. Л.; "Судостроение" 1965, с. 435-438.

References

1. Katalog X Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona promyshlennoj sobstvennosti «ARHIMED». Chast' I. Vibrozoljatory korabel'nyh tehniceskij sredstv. Sbornyj vibrozoljator. [Vibration isolators of ship technical means. Precast vibration isolator.] Ustrojstvo dlja opredelenija krutil'noj zhestkosti vibrozoljatorov. «Centr sodejstvija razvitiju izobretatel'stva i racionalizacii VOIR». M. 2007.-407s. (s. 1127, 129). Chast' I I. Vibrozolirujushhee ustrojstvo. 144s. (s. 51).
2. Katalog XI Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobretenij i innovacionnyh tehnologij «ARHIMED». Vibrozoljatory. Sbornyj vibrozoljator. [Vibration isolator. Precast vibration isolator. Device for determining the

- torsional stiffness of vibration isolators]. Ustrojstvo dlja opredelenija krutil'noj zhestkosti vibroizoljatorov. «Centr sodejstvija razvitiju izobretatel'stva i racionalizacii VOIR». M. 2008.-438s. (s. 145, 174).
3. Katalog XII Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij «ARHIMED». Chast' I. Vibroizolirujushhee ustrojstvo. Vibroizoljatory.[The anti-vibration device. Vibration isolator]. «Centr sodejstvija razvitiju izobretatel'stva i racionalizacii VOIR». M. 2009.-438s. (s. 38, 130).
 4. Katalog XIII Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij «ARHIMED». Chast' I. Vibroizolirujushhie ustrojstva.[The anti-vibration device]. «Centr sodejstvija razvitiju izobretatel'stva i racionalizacii VOIR». M. 2010.-256s. (s. 69).
 5. Jelektronnyj Katalog XIV Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 5-8 aprelja 2011 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.inovexpo.ru. www.mosvoir.ru.
 6. Jelektronnyj Katalog XV Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 20-23 marta 2012 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.inovexpo.ru.
 7. Jelektronnyj Katalog XVII Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 01-04 aprelja 2014 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.inovexpo.ru.
 8. Jelektronnyj Katalog XVIII Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 02-05 aprelja 2015 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
 9. Jelektronnyj Katalog XIX Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 29 marta-1 aprelja 2016 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
 10. Jelektronnyj Katalog XX Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 5-8 aprelja 2017 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
 11. Jelektronnyj Katalog XXI Moskovskogo mezhdunarodnogo Salona izobrenij i innovacionnyh tehnologij [Salon of inventions and innovative technologies]. «ARHIMED». 5-8 aprelja 2018 goda. Rossiya, Moskva, JekoCentr «Sokol'niki». www.archimedes.ru. www.mosvoir.ru.
 12. Istomin P.A. Krutil'nye kolebanija v sudovyh DVS.[Torsional fluctuations in ship's internal combustion engines]. L.; "Sudostroenie", 1968.,c.43,ris.14a.
 13. Beljakovskij N.G. Konstruktivnaja amortizacija mehanizmov,[Structural depreciation of mechanisms]. priborov i apparatury na sudah. L.; "Sudostroenie" 1965, c. 435-438.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Минас Арменакович Минасян, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mamsar@mail.ru

Армен Минасович Минасян, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, 198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101, e-mail: mamsar@mail.ru

Цзюньцзе Цзэн, аспирант, кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: tzeng817@gmail.com

Хи Ха Лэ, аспирант, кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: huyhalemt@mail.com

Minas A. Minasyan Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

Armen M. Minasyan, Ph.D. (Eng), Docent of the Department of computer engineering and information technology, Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation, e-mail: mamsar@mail.ru

Junjie Zeng, Postgraduate Student, Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: tzeng817@gmail.com

Le Huy Ha, Postgraduate Student, Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: huyhalemt@mail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.048

УДК 621.31; 632.151

Оценка возможности уменьшения конструктивного коэффициента энергетической эффективности за счет применения валогенераторов в составе судовых энергетических установок с главными высокооборотными двигателями

В.В. Медведев¹, В.В. Гаврилов², И.А. Сорокин¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова

Аннотация. В статье выполнена оценка возможности уменьшения конструктивного коэффициента энергетической эффективности (ККЭЭ – EEDI) за счет применения валогенератора (ВГ) в составе судовой энергетической установки (СЭУ) для судов с главными высокооборотными двигателями (ВОД). Рассмотрена формула расчета конструктивного коэффициента энергетической эффективности, особое внимание уделено особенностям ее применения при учете ВГ в зависимости от мощностей главной энергетической установки (ГЭУ) и ВГ. Рассмотрены варианты расчета EEDI при работе ГЭУ с ВГ, а также способы поддержания постоянного напряжения вырабатываемого тока. Произведена модификация формулы путем приведения сравниваемых вариантов к одинаковому объему грузоперевозок, рассчитан EEDI для ряда дизельных ВОД с учетом и без учета ВГ, работающих по винтовой и нагрузочной характеристикам. Расчетным путем найдено процентное изменение EEDI при использовании ВГ. Определена наиболее рациональная мощность ВГ для применения в целях снижения EEDI.

Ключевые слова: конструктивный коэффициент энергетической эффективности, валогенератор, парниковые газы, дизельный двигатель, главная энергетическая установка, электростанция

Evaluation of the possibility of reducing the energy efficiency design index based on the application of shaft generators in the composition of marine power plant with main high-speed engine

Valery V. Medvedev¹, Vladimir V. Gavrilov², Ivan A. Sorokin¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation, ²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russian Federation

Abstract. The paper assesses the possibility of lowering the energy efficiency design index (EEDI) by using a shaft generator as part of the ship's power plant for ships with main high-speed engines. The formula for calculating the energy efficiency design index is considered, special attention is paid to the features of its application when taking into account the SH, depending on the capacities of the main power plant and shaft generator. The options for calculating EEDI during operation of the main power plant with a shaft generator, as well as ways to maintain a constant voltage of the generated current, are considered. The formula was modified by bringing the compared options to the same volume of cargo transportation, the EEDI was calculated for a number of high-speed diesel engines with and without taking into account the shaft generator operating according to the screw and load characteristics. By calculation, the percentage change in EEDI was found when using a shaft generator. The most rational power of the shaft generator for use in order to reduce EEDI is determined.

Keywords: energy efficiency design index, shaft generator, greenhouse gases, diesel engine, main power plant, power station

Введение

Международная морская организация (International maritime organization – IMO) ввела конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ, Energy Efficiency Design Index – EEDI), который является одним из инструментов для ведения политики по сокращению выбросов парниковых газов с целью предотвращения загрязнения окружающей среды [1]. В данном коэффициенте рассматривается только один парниковый газ, а именно – диоксид углерода (CO₂), т.к. выбросы этого газа от судов преобладают над другими. По требованиям IMO данный коэффициент необходимо рассчитывать для каждого нового и уже эксплуатируемого судна валовой вместимостью 400 тонн и более [2]. Полученное значение называется достигнутым EEDI, и оно должно быть ниже, либо равно требуемому EEDI, который определяется

установленными нормами (по базовым линиям, в зависимости от текущего года) [3].

Использование в составе судовых энергетических установок (СЭУ) различных типов валогенераторов (ВГ), работающих от главной энергетической установки (ГЭУ), – достаточно изученное явление [4]. Генерирование электрической энергии при помощи ГЭУ является рациональным способом экономии, т.к. ГЭУ обладают меньшим удельным расходом топлива и большим ресурсом работы, по сравнению со вспомогательными дизель-генераторами (ДГ). Также известно, что ВГ положительно влияет на энергетическую эффективность судна, которая учитывается в формуле EEDI. Однако уменьшение EEDI за счет применения ВГ требует более подробного рассмотрения [5]. Здесь следует отметить, что есть определенные неясности с применением методики учета ВГ при расчете EEDI, отмеченные, например, в работе [6]. Отсутствие положительного эффекта показано в работе [7], для

случая применения ВГ в составе энергетических установок СПГ-танкеров с главными двухтопливными малооборотными двигателями внутреннего сгорания.

В данной статье рассматривается целесообразность применения ВГ, в целях уменьшения конструктивного коэффициента энергетической эффективности, в составе ГЭУ с дизельными высокооборотными двигателями (ВОД), поскольку для таких двигателей подобрана достаточно представительная выборка многопараметровых характеристик.

1. Особенности применения формулы для расчета EEDI при учете валогенератора

Конструктивный коэффициент энергетической эффективности – это экологический показатель судна, характеризующий отношение количества выбросов парниковых газов (г CO₂) к объему грузоперевозок (т·миля) [1]. Данный коэффициент рассчитывается по следующей формуле:

$$EEDI = (A+B+C-D)/E, \quad (1)$$

где *A* и *B* – отражает выбросы CO₂ ГЭУ, в зависимости от ледового класса, и вспомогательными ДГ электростанции, соответственно; *C* – учитывает влияние выбросов CO₂ при потреблении энергии электромотором, а также высвобождающуюся энергию в результате применения утилизационных и инновационных технологий (при наличии); *D* – снижение выбросов CO₂ ГЭУ за счет приведения судна в движение при помощи применения инновационных технологий (при наличии); *E* – работа по грузоперевозке, может корректироваться коэффициентами, в зависимости от конструкции, типа судна или погодных условий при его эксплуатации [5].

Учет ВГ производится в слагаемых *A* и *B* [2]. В частности, используется величина *P_{PTO}*, которая составляет 75% от номинальной электрической выходной мощности каждого ВГ и рассчитывается по формуле:

$$P_{PTO} = MCR_{PTO} \cdot 0,75, \quad (2)$$

где *MCR_{PTO}* – номинальная мощность ВГ в кВт.

Величина *P_{PTO}* учитывается в слагаемом *A* следующим образом [2]:

$$A = P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}, \quad (3)$$

где *C_{FME}* – безразмерный коэффициент, зависящий от типа топлива, применяемого в ГЭУ, определяемый по содержанию углерода в топливе; *SFC_{ME}* – удельный эффективный расход топлива ГЭУ. При наличии ВГ *P_{ME}* рассчитывается как:

$$P_{ME} = 0,75 \cdot (MCR_{ME} - P_{PTO}), \quad (4)$$

где *MCR_{ME}* – номинальная мощность главной энергетической установки.

В слагаемом *B* учет ВГ производится так:

$$B = P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}, \quad (5)$$

где *C_{FAE}* – безразмерный коэффициент, зависящий от типа топлива, применяемого в вспомогательном дизель-генераторе (ДГ); *SFC_{AE}* – удельный эффективный расход топлива вспомогательного ДГ. Величина *P_{AE}* вычисляется:

при *MCR_{ME}* ≥ 10000 кВт

$$P_{AE} = 0,025 \cdot MCR_{ME} + 250; \quad (6)$$

при *MCR_{ME}* < 10000 кВт

$$P_{AE} = 0,05 \cdot MCR_{ME}. \quad (7)$$

Слагаемое *B*, при наличии ВГ, определяется по формуле [3]:

если $0,75 \cdot P_{PTO} \leq P_{AE}$

$$B = 0,75 \cdot P_{PTO} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}; \quad (8)$$

если $0,75 \cdot P_{PTO} > P_{AE}$

$$P_{PTO} = P_{AE} / 0,75. \quad (9)$$

Можно констатировать, что наблюдается определенное противоречие в использовании при расчетах *EEDI* с учетом ВГ коэффициента 0,75. Так, он применен в формуле (2) и еще раз в формулах (4) и (8). Поскольку пояснения этого явления в [2, 3] отсутствуют, то можно предположить, что такая манипуляция эквивалентна введению бонуса за использование ВГ. Поскольку, во-первых, его применение приводит к уменьшению *EEDI*, во-вторых, аналогичная практика поощрения инноваций предусмотрена в формуле (1), где соответствующие коэффициенты задаются в явном виде для *A*, *C*, *D* и *E* [2].

Уменьшение *EEDI* за счет подбора ВГ возможно реализовать за счет того, что удельный расход топлива ГЭУ меньше, чем удельный расход топлива ДГ, тогда замена ДГ на ВГ приводит к снижению выбросов CO₂, следовательно, к снижению *EEDI*. Однако достижимая степень такого снижения требует проведения дополнительных расчетов.

Также необходимо отметить, что в расчетах *EEDI* расход топлива ГЭУ определяется на мощности 75% от номинальной. На рис. 1 и 2 представлены значения удельных расходов топлива ВОД, работающих по винтовой и нагрузочной характеристике, соответственно. Они получены на основе обработки многопараметровых характеристик двигателей. По оси абсцисс отложены обороты вращения коленчатого вала двигателя, в % от номинальных для винтовой характеристики и мощность двигателя в % от номинальной для нагрузочной, а по оси ординат – удельный расход топлива в г/(кВт·ч). Эти данные были использованы далее при проведении исследования.

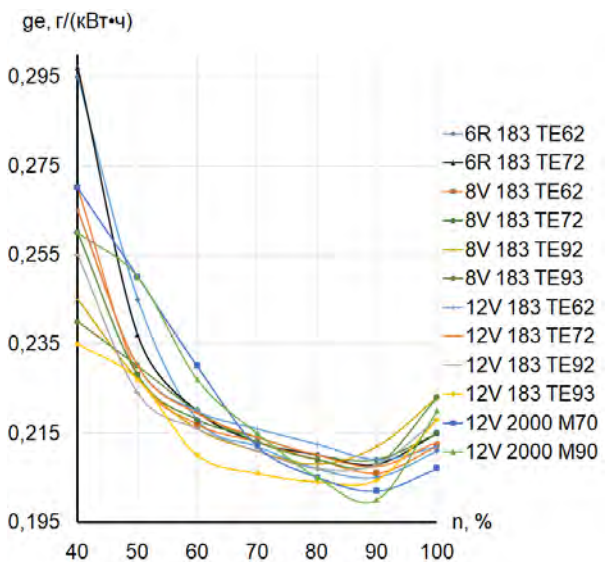


Рис. 1. Сравнение расхода топлива ВОД, работающих по винтовой характеристике

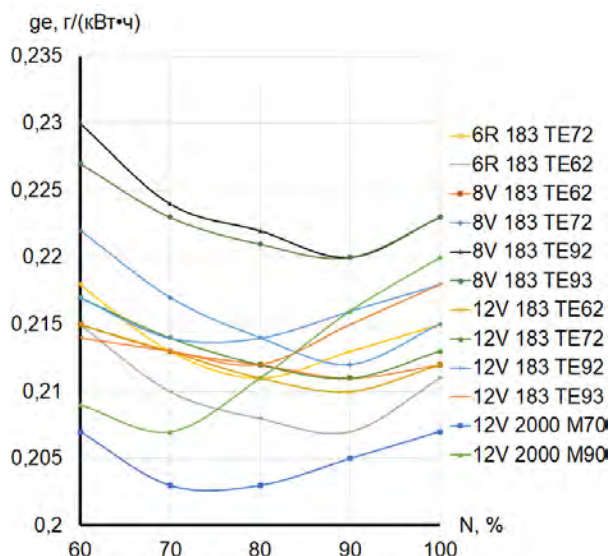


Рис. 2. Сравнение расхода топлива ВОД, работающих по нагрузочной характеристике

Как видно из рис.1, расход топлива ВОД, работающих по винтовой характеристике, определенный на мощности, равной 75% от номинальной, является минимальным для основной массы двигателей.

Сравнение расхода топлива ВОД, работающих по нагрузочной характеристике, показывает другие результаты (см.рис.2). Можно сделать вывод о том, что минимальные расходы топлива для большинства двигателей находятся на мощностях, равных,

примерно, 80-90% от номинальной и, в целом, на долевых режимах превышают значения удельных расходов при работе по винтовой характеристике на аналогичных мощностях.

2. Описание исследованных вариантов расчета EEDI при работе главной энергетической установки с валогенератором

Расчеты EEDI при работе ГЭУ с ВГ возможны для нескольких известных случаев [4].

Первым вариантом является расчет EEDI при работе ГЭУ по нагрузочной (генераторной) характеристике, т.е. с постоянной частотой вращения ВГ. Регулирование скорости судна добиваются применением гребного винта регулируемого шага (ВРШ) путем изменения его шагового отношения [4].

Второй вариант – расчет EEDI при работе ГЭУ по винтовой характеристике. В данном варианте возможно использование винта фиксированного шага, т.к. нет необходимости поддерживать постоянно обороты гребного вала. Частота вращения ВГ может быть, как постоянной, так и переменной. В случае с постоянной частотой вращения, ее стабилизация происходит при помощи планетарных передач, электромеханических муфт скольжения, либо гидравлическими системами стабилизации, а при переменной частоте вращения ВГ, постоянство частоты напряжения в судовой сети обеспечивается электромашиными преобразователями, либо полупроводниковыми преобразователями [4].

Исследованные варианты работы ГЭУ с ВГ при расчете EEDI представлены на рис.3.



Рис. 3. Работа главной энергетической установки с валогенератором

3. Порядок проведения расчетов

Для удобства анализа величины влияния применения ВГ на значение EEDI использована следующая формула:

$$\Delta EEDI = (EEDI_{ВГ} / EEDI) \cdot 100\% \quad (10)$$

В числителе производится расчет EEDI с ВГ, в знаменателе – EEDI без ВГ. При этом из формулы (1) изымаются слагаемые C и D, для исключения действия на величину EEDI других способов снижения выброса парниковых газов. Кроме того, принимается, что у сравниваемых вариантов

одинаковый объем грузоперевозок. Это дает возможность не определять значение E .

Значение $EEDI$ находилось, с использованием соотношений (2)-(9), для ряда дизельных ВОД без учета ВГ, а также для двигателей с учетом ВГ, работающих по винтовой и нагрузочной характеристикам. Расход топлива каждого ДВС определялся при мощности, равной 75% от номинальной, – по многопараметровой характеристике, представленной в справочных материалах завода-изготовителя. Согласно рекомендациям [2], удельный расход топлива ДГ принят, в данном исследовании, постоянным и равным 215 г/(кВт·ч).

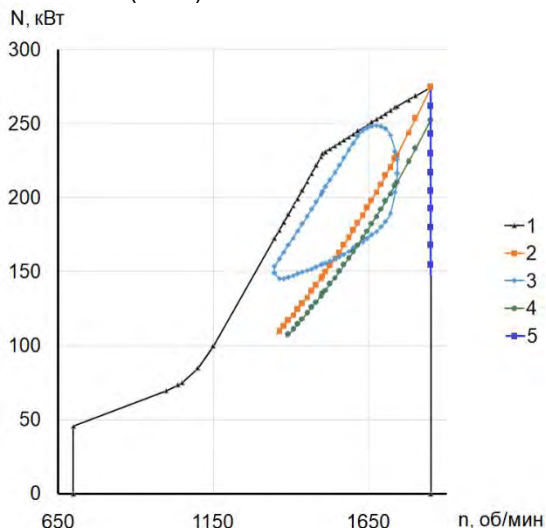


Рис. 4. Многопараметровая характеристика двигателя MTU 6R 183 TE62: 1 – ограничительная характеристика; 2 – винтовая характеристика с включенным ВГ; 3 – зона минимального расхода топлива; 4 – винтовая характеристика с выключенным ВГ; 5 – нагрузочная характеристика

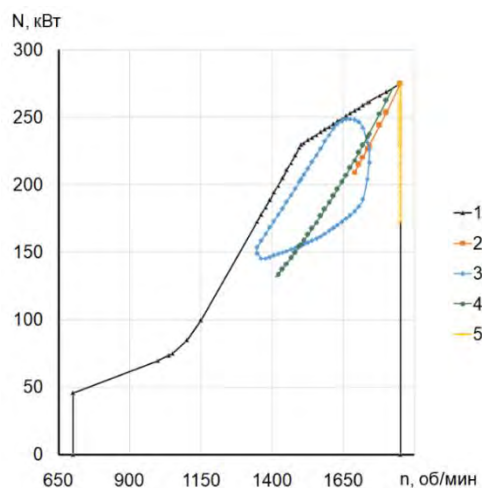


Рис. 5. Многопараметровая характеристика двигателя MTU 6R 183 TE62: 1 – ограничительная характеристика; 2 – винтовая характеристика с выключенным ВГ; 3 – зона минимального расхода топлива; 4 – винтовая характеристика с включенным ВГ; 5 – нагрузочная характеристика

Примеры взаимного расположения зоны минимальных удельных расходов топлива, винтовых и нагрузочных характеристик, при разном включении ВГ в нагрузку ВОД, представлены на рис.4 и 5, где по оси абсцисс отложены обороты вращения коленчатого вала двигателя, в об/мин, а по оси ординат – мощность, в кВт. На рис.4 показан вариант, когда в точку максимальной длительной мощности (номинальный режим) характеристики сходятся при включенном ВГ. На рис.5, – когда в точку максимальной длительной мощности характеристики сходятся при выключенном ВГ.

Для удобства вычислений была разработана программа на языке программирования Python. Результаты расчетов по формуле (10) приведены в табл.

Таблица

Данные, полученные при расчете EED

Марка двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальные обороты, об/мин	Расход топлива на номинальном режиме, г/(кВт·ч)	$\Delta EEDI$ при работе ВОД по винтовой характеристике, %	$\Delta EEDI$ при работе ВОД по нагрузочной характеристике, %
6R 183 TE62	275	1850	205	8,59	6,36
6R 183 TE72	305	1900	208	8,50	6,75
8V 183 TE62	365	2000	207	8,53	6,32
8V 183 TE72	405	2100	209	8,48	5,85
8V 183 TE92	490	2300	212	8,39	4,94
8V 183 TE93	564	2400	211	8,42	3,21
12V 183 TE62	550	2000	209	8,48	7,16
12V 183 TE72	610	2100	207	8,53	6,32
12V 183 TE92	735	2300	209	8,48	6,29
12V 183 TE93	846	2400	205	8,59	5,47
12V 2000 M70	788	2100	202	8,68	7,78
12V 2000 M90	1007	2300	206	8,56	7,23

4. Анализ полученных данных

По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что установка ВГ привела к снижению $EEDI$ для ВОД, работающих по винтовой и нагрузочной характеристике, в среднем на 8,52% и 6,14%, соответственно.

Также можно сделать вывод о том, что максимальный эффект снижения $EEDI$ достигается при установке ВГ мощностью 8,8%, от номинальной мощности ГЭУ. Превышение этого значения приводит к невозможности выполнения условия: $0,75 \cdot P_{PTO} \leq P_{AE}$, следовательно, к

невозможности осуществления учета ВГ в слагаемом В формулы (1).

Сравнение результатов расчетов вариантов использования ВГ, при работе с двигателем на номинальном режиме с включенным или выключенным ВГ, показали незначительное различие в изменении EEDI.

Можно предположить существование возможности получения большего эффекта при использовании ВГ, если они будут применяться с двигателями других типов, имеющими большее различие в удельном расходе топлива с двигателями ДГ.

Заключение

1. Установлено, что применение валогенератора приводит к снижению конструктивного коэффициента энергетической эффективности, следовательно, к снижению CO₂, выбрасываемого в атмосферу.

2. Для снижения EEDI более выгодно использовать валогенератор с двигателем, работающим по винтовой характеристике.

3. Расчеты показали, что наиболее рационально применение валогенератора мощностью равной 8,8% от мощности главной энергетической установки.

Литература

1. Иванченко А.А., Петров А.П., Живлюк Г.Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015, №3(31). С.103-112.
2. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships (Annex 5, Resolution MEPC.308(73), Adopted on 26 October 2018). 36 s.
3. №38 Procedure for calculation and verification of the energy efficiency design index (EEDI). 81 s.
4. Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2009. 176 с.
5. Медведев В.В., Гаврилов В.В., Киселев С.Н. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №2(40), Т.1. С.94-103.
6. David Anink, Marnix Krikke Analysis of the effect of the new EEDI requirements on Dutch build and flagged ships. Centre for Maritime Technology and Innovation. July 2011. Projectnumber 3134. 46 s.
7. Медведев В.В., Жуков В.А., Туркин И.И., Голубев Р.О. Анализ целесообразности применения валогенераторов в составе СЭУ СПГ-танкеров с главными двухтопливными МОД посредством систем глубокой утилизации теплоты // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №1(43), Т.1. С.96-102.

References

1. Ivanchenko A.A., Petrov A.P., Zhivlyuk G.Ye. Energeticheskaya effektivnost' sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovykh gazov [Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2015, N 3(31), S.103-112.
2. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships (Annex 5, Resolution MEPC.308(73), Adopted on 26 October 2018). 36 s.
3. №38 Procedure for calculation and verification of the energy efficiency design index (EEDI). 81 s.
4. Grigor'yev A.V., Petukhov V.A. Sovremennyye i perspektivnyye sudovyye valogeneratornyye ustanovki [Modern and perspective ship shaft generator sets]: monografiya. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O.Makarova, 2009. 176 s.
5. Medvedev V.V., Gavrilov V.V., Kiselev S.N. Obzor i analiz vozmozhnostej razlichny'x sposobov pov'ysheniya e'nergeticheskoy e'ffektivnosti sudov [Review and analysis of the possibilities of various ways to increase the energy efficiency of ships]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2018, N 2(40), T1, S.94-103.
6. David Anink, Marnix Krikke Analysis of the effect of the new EEDI requirements on Dutch build and flagged ships. Centre for Maritime Technology and Innovation. July 2011. Projectnumber 3134. 46 s.
7. Medvedev V.V., Zhukov V.A., Turkin I.I., Golubev R.O. Analiz tselesoobraznosti primeneniya valogeneratorov v sostave SEU-SPG-tankerov s glavnymi dvukhtoplivnymi MOD posredstvom sistem utilizatsii teploty [Analysis of the appropriateness of using shaft generators as part of the SEU of LNG tankers with the main dual-fuel MODs by means of deep heat recovery systems]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2019. N 1(43), T1, S.96-102.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Викторович Медведев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Valery V. Medvedev, Dr. Sci. (Eng.), associate professor, professor of the department of marine combustion engine and diesel plant, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Владимир Васильевич Гаврилов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: gavrilov@vg5647.spb.edu

Vladimir V. Gavrilov, Dr. Sci. (Eng.), professor, professor of the department of the theory and design of marine combustion engine, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya street, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: gavrilov@vg5647.spb.edu

Иван Алексеевич Сорокин, студент магистр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: 7054@bk.ru

Ivan A. Sorokin, Master's degree student, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: 7054@bk.ru

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕDOI 10.37220/MIT.2020.47.1.038
УДК 004.946**Средства информационного обеспечения функционирования группы автономных необитаемых подводных аппаратов с мультиагентной системой управления**В.Г. Михлин¹, Н.Н. Семенов¹, Е.Б. Михлина¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Область применения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) сегодня весьма обширна и постоянно увеличивается. Все чаще рассматриваются варианты группового применения аппаратов для повышения скорости и эффективности выполнения работ. Одно из приоритетных направлений управления группой аппаратов – мультиагентная система управления, которая, несомненно, имеет значительные преимущества перед централизованной и сегодня представляет собой одно из наиболее перспективных направлений в области подводного роботостроения. Для создания таких систем требуется решение большого количества технических проблем, среди которых можно выделить две основные задачи: обеспечение эффективной координации аппаратов при их групповом применении и создание программной платформы, обеспечивающей взаимодействие большого количества разнородных устройств и программ. Вопросам создания технических средств обеспечения функционирования АНПА в мультиагентной среде посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: АНПА, подводный аппарат, система управления, мультиагентная система управления, MAS

Means of information support for the functioning of a group of autonomous uninhabited underwater vehicles with a multi-agent control systemValeriy G. Mikhlin¹, Nikolai N. Semenov¹, Elena B. Mikhlina¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The field of application of Autonomous uninhabited underwater vehicles (AUV) is very extensive today and is constantly increasing. More and more often options of group application of devices are being considered for enhance of effectiveness and speed of mission completion. One of the priority areas for managing a group of devices is a multi-agent control system (MAS), which undoubtedly has significant advantages over a centralized one and today represents one of the most promising areas in the field of underwater robot engineering. The creation of such systems requires the solution of many technical problems, among which there are two main tasks: ensuring the effective coordination of devices in their group application and creating a software platform that provides interaction of a large number of heterogeneous devices and programs. This article is devoted to the creation of technical means to ensure the functioning of AUV in a multi-agent environment.

Keywords: AUV, underwater vehicle, control system, multi-agent control system, MAS

Введение

Постоянно усложняющиеся задачи, которые сегодня ставятся перед отдельными роботами и тем более перед их группой, требуют повышение интеллектуальной и функциональной насыщенности автономных роботов, в том числе автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), а ограниченные энергетические и временные ресурсы на выполнение работы («миссии») приводят к необходимости разделения работы на несколько роботов, но такое разделение требует усложнения системы управления для синхронизации совместной работы, чтобы роботы не мешали друг другу и эффективно выполняли общую задачу.

Классический подход с централизованным управлением оказывается не всегда реализуемым и работоспособным из-за ограничений каналов связи по дальности, скорости и надежности доставки информации, поэтому группа роботов (АНПА) должна быть автономной и самостоятельно делить между собой части общей задачи. В работе [1] рассматривались различные подходы к групповому управлению, и наиболее перспективным по эффективности управления признана мультиагентная система управления. При этом каждый робот является самостоятельным агентом,

который способен выполнить всю работу самостоятельно, но при наличии «помощника» может делегировать часть работы ему. При этом в группе агентов нет единого управляющего центра, нет командного режима работы, есть коллектив роботов, объединенных целью эффективно выполнить групповую задачу, что увеличивает надежность и гибкость всей системы.

Таким образом, актуальность применения мультиагентной системы управления группой АНПА при решении различных задач не вызывает сомнения. В качестве примера приведем статью [2] – групповое применение АНПА при решении противоминной задачи. Трудно переоценить важность применения группы АНПА при проведении сейсмозазведки в Мировом океане, особенно в тяжелых условиях, например, при наличии ледяного покрова или на больших (свыше 3000 м) глубинах [3, 4].

Задача группового применения АНПА широко обсуждается в научных изданиях. Среди основных задач, требующих решения при групповом применении АНПА выделяют:

- обеспечение эффективной координации аппаратов при групповом применении и

- создание программной платформы, обеспечивающей взаимодействие большого количества разнородных устройств и программ [5].

Определяющее значение для эффективной координации группы аппаратов играют средства информационного обеспечения их функционирования.

Требования к аппарату

Для формирования группы аппаратов им необходимо иметь следующий набор средств:

1. каждый аппарат должен быть самостоятельным агентом, несущим свою полезную нагрузку и способным функционировать самостоятельно, но при этом не мешать работать другим аппаратам в группе;

2. для обмена информацией внутри группы каждый аппарат должен иметь средства коммуникации (модем). Для АНПА это гидроакустический модем, позволяющий на максимальной дальности и скорости передавать сообщения. Такие модемы производят как иностранные компании (EvoLogocs [6], Aquatec [7], Sonardyne [8], ...) , так и отечественными (Лаборатория подводной связи и навигации [9], Штиль, ...);

3. для определения взаимного положения аппаратов в группе каждый аппарат должен иметь средства взаимного позиционирования. Для АНПА это система позиционирования на ультракороткой базе, так как другие системы (позиционирование на длинной базе и на короткой базе) технически не реализуемы для мобильной группы малогабаритных АНПА без предварительной разметки территории буями-ответчиками. Такие системы позиционирования разрабатываются и производятся в основном иностранными компаниями (Aquatec, Sonardyne, Evologics, Develogic [10], ...);

4. для передачи сообщений всей группе на одном или нескольких аппаратах в группе должен быть дополнительный модем дальней связи. Полученные им команды передаются всем членам группы по локальным средствам коммуникации, обратно собирается информация о состоянии группы и по модему дальней связи по запросу отправляется на пост управления.

Существующие модемы и системы позиционирования достаточно громоздки, имеют недостаточную дальность связи при требуемой скорости передачи информации, недостаточную точность позиционирования. Требуется разработка компактного гидроакустического модема на дистанции до единиц километров со скоростью от 5-6 до 25 килобит/секунду с интегрированной системой позиционирования на ультракороткой базе.

Важным элементом при создании мультиагентных систем является язык коммуникации агентов – Agent Communication Language, который определяет типы сообщений, которыми могут обмениваться агенты. В рамках парадигмы коммуникации между агентами, кооперация между ними достигается за счет ACL, языка контента и онтологии, которые определяют набор базовых концепций, используемых в сообщениях кооперации. Онтология здесь выступает синонимом понятия API (Application Programming Interface), т.е. она определяет конкретный интерфейс интеллектуальных агентов [3].

На техническом уровне коммуникация между агентами происходит за счет передачи сообщений используя какой-либо транспортный протокол нижнего уровня (SMTP, TCP/IP, HTTP, IIOP). В настоящее время языки коммуникации агентов продолжают эволюционировать. Поскольку совместимость – определяющая характеристика агентов, при разработке MAS – очень важна именно стандартизированная коммуникативность [4]. Основными объектами для стандартизации являются: архитектура агента, языки взаимодействия агентов, протоколы взаимодействия агентов, знания агентов, языки программирования агентов.

При разработке собственной мультиагентной сети АНПА был выбран разработанный FIPA протокол Contract Net Protocol (CNP) с модификацией, при которой абстрактные тендеры заменены на виртуальные денежные отношения.

Протокол обмена между агентами показан на рис. 1.

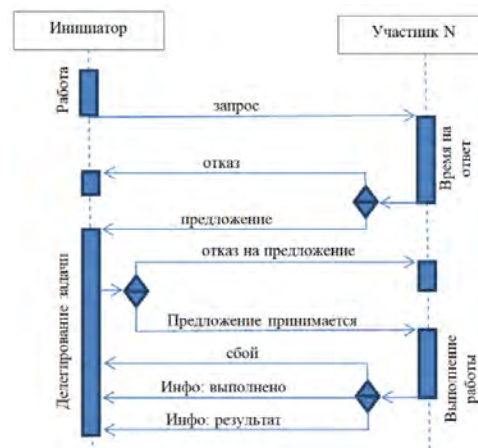


Рис. 1. Протокол обмена Contract Net Protocol

В момент поступления каждой задачи (элемент миссии) создается агент задачи, атрибутами которого в данной предметной области будут следующие поля:

- адрес получателя сообщения (два байта),
- адрес отправителя сообщения (два байта),
- время поступления задачи (два байта в формате секунд от начала миссии),
- объем данных задачи (список задач в виде цепочки) или подтверждение (1 байт),
- приоритет задачи (высокий, средний, низкий), если известен (1 байт),
- состояние текущего виртуального счета (4 байта),
- контрольная сумма (два байта).

Итого минимальный пакет 14 байт. В случае, когда сообщение оказывается невозможно доставить напрямую от отправителя до получателя, необходимо поддерживать перепосылку запроса агентами, которые не являются получателями, но доступны для приема от отправителя.

Методы оптимизации взаимодействия аппаратов в группе

На основании имеющейся информации агент старается максимизировать «прибыль» всей группы агентов при минимальных собственных «затратах», и

при этом получить одобрение других агентов. То есть действие агента i должны быть.

$$\pi_i(s) = \arg \max E[u_i, s, a] \quad (1)$$

где u_i – затраты агента i , s – состояние выполнения миссии группой агентов, a – внешние воздействия, $E[u, s, a]$ – эффективность выполнения миссии.

Тогда эффективность работы группы агентов можно выразить как

$$\eta = \frac{\sum_i E[u_i, s, a]}{\sum_i E_i \cdot T}, \quad (2)$$

где E_i – производительность агента i , T – время работы группы.

При наличии нескольких агентов, претендующих на выполнение одной и той же задачи ближайшие соседи выбирают арбитра, который принимает решение на основании теоремы о консенсусе [1].

Вероятность сбоя выполнения миссии группой роботов может быть выражена для детерминированной группы через вероятность отказа узловых элементов группы:

$$P_D(t) = 1 - \prod_{k=1}^N (1 - P_k(t)),$$

где $P_k(t)$ – вероятность отказа робота k , N – количество роботов в группе. То есть надежность системы определяется произведением надежности всех элементов системы.

Но при использовании мультиагентной системы управления вероятностью сбоя определяется только вероятностью выхода из строя всех роботов, способных выполнить задачу:

$$P_{MAC}(t) = \min\{P_k(t)\}.$$

Таким образом, использование мультиагентной системы позволяет строить надежные с точки зрения выполнения миссии в меняющихся условиях группы роботов.

Пример взаимодействия – движение строем

Рассмотрим простой типовой пример – движение группы роботов строем для обследования территории, обнаружения вторжения, съемки батиметрии, сейсморазведке. Для этого необходимо сформировать строй, начать движение и в процессе движения поддерживать строй при наличии внешних возмущающих факторов, таких как препятствия, течения, выход робота из строя и так далее.

В литературе в большинстве случаев для решения задачи управления строем используются следующие подходы:

1. задать заранее желаемое расстояние между парами агентов и применить теорию жесткости графов [4, 5];
2. задать желаемое положение агента относительно его соседей через вектора и воспользоваться правилами консенсуса (усреднения) [5];
3. в каждый момент времени передавать агентам информацию о положении и направлении движения, на основании чего каждый агент может сконструировать виртуального лидера и следовать за ним [3,5].

Одним из главных затруднений, с которым сталкиваются на практике перечисленные подходы, является применимость разработанных на их основе алгоритмов на практике с учетом следующих внештатных ситуаций:

- выход из строя одного или нескольких агентов с последующей потерей связи, особенно агента-лидера;
- приобретение связи с агентом, который по мере движения к цели оказался в зоне связи других агентов;
- неполадки связи с координационным (ситуационным) центром (в подходах, где предполагается передача значимой для управления информацией агентам в каждый момент времени).

В каждом из подходов предпринимались попытки сгладить указанные недостатки, но чаще всего при помощи наложения дополнительных ограничений (предположение возможности установления связи между любыми агентами [5], сохранение фиксации места каждого агента в строю после введения различных возможных геометрических структур строя для разного количества агентов [4]). Во многих существующих подходах агенты фактически не являются взаимозаменяемыми, так как место в структуре строя зачастую зафиксировано за агентом с конкретным номером. Подходы, где в каждый момент времени агентам передаются координаты точек и направление движения, фактически не соответствуют принципам децентрализованного управления, так как в таких подходах предполагается наличие центра управления, в котором происходит планирование заданий и из которого к каждому агенту по каналу связи непрерывно поступает информация, необходимая агенту для управления своим передвижением [4].

Необходимо применение мультиагентной системы управления, в которой каждый робот является самостоятельным агентом, который может выполнить всю необходимую работу самостоятельно, но при наличии других роботов он может делегировать часть работы им, при этом контролируя эффективность такого перераспределения задач. Для этого у каждого робота должен быть инстинкт «желания эффективно выполнить задачу» и возможность коммуникации с другими роботами для перераспределения задач.

Естественное ограничение по скорости и дальности связи между роботами приводит к необходимости ограничения количества информации, передаваемой между ними, и как следствие к увеличению интервалов времени для планирования задач и размера обследуемой области (в случае, когда группа роботов обследует территорию).

Заключение

Таким образом, для построения надежной и эффективной группы автономных подводных аппаратов необходимо:

1. оснастить каждый АНПА системой связи и взаимного позиционирования в группе (гидроакустическим модемом с позиционированием на ультракороткой базе);
2. обеспечить как минимум одному из АНПА в группе способ дистанционного получения от центра

управления команд для всей группы и отправления текущего статуса группы;

3. использовать мультиагентную систему управления на всех АНПА в группе. Несмотря на то, что мультиагентные системы управления (МАС), как и нейронные сети, не могут

дать оптимального решения задачи управления поведением группы роботов, они могут найти подходящее решение в динамически меняющихся условиях, что и определяет необходимость их использования.

Литература

1. Kozhemyakin I., Rozhdestvensky K., Ryzhov V., Semenov N., Chemodanov M.: Educational Marine Robotics in SMTU. ICR 2016: 79-88
2. Autonomous Navigation: The Secret of Successful UUVs. Frank van Mierlo, Bluefin Robotics Corporation. 237 Putnam Avenue, Cambridge? MA 02139 USA;
3. Бахарев С.А., Карасев В.В., Карасев А.В. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения Мирового океана.. – 2015 г.;
4. Бардачевский Н.Н., Безсуднов Е.Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрофизических исследований и подводной навигации.– 2013 г.;
5. В.И. Городецкий, О.В. Карасев, В.В. Самойлов, С.В. Серебряков Прикладные многоагентные системы группового управления. - Искусственный интеллект и принятие решений, 2.2009 г.;
6. Рекламный проспект фирмы Evologics [электронный ресурс] - <https://evologics.de/>;
7. Рекламный проспект фирмы Aquatec [электронный ресурс] -<http://www.aquatecgroup.com/19-solutions/179-acoustic-co>
8. Рекламный проспект фирмы Sonardyne - <https://www.sonardyne.com/product/ranger-2-subsea-positioning-usbl/mcommunication>;
9. Рекламный проспект Лаборатории подводной связи и навигации [электронный ресурс] - <https://unavlab.com/>;
10. Рекламный проспект фирмы Develogic [Электронный ресурс] - <http://www.develogic.de/>.

References

1. Kozhemyakin I., Rozhdestvensky K., Ryzhov V., Semenov N., Chemodanov M.: Educational Marine Robotics in SMTU. ICR 2016: 79-88
2. Autonomous Navigation: The Secret of Successful UUVs. Frank van Mierlo, Bluefin Robotics Corporation. 237 Putnam Avenue, Cambridge? MA 02139 USA;
3. Baharev S.A., Karasev V.V., Karasev A.V. Ispol'zovanie avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov v processe izuchenija Mirovogo okeana. [Use of Autonomous uninhabited underwater vehicles in the process of studying the world ocean]– 2015 g.;
4. Bardachevskij N.N., Bezsudnov E.Ju. Sostojanie i perspektivy primenenija neobitaemyh podvodnyh apparatov v oblasti gidrofizicheskikh issledovanij i podvodnoj navigacii.[State and prospects of application of uninhabited underwater vehicles in the field of hydrophysical research and underwater navigation] – 2013 g.;
5. V.I. Gorodeckij, O.V. Karasev, V.V. Samojlov, S.V. Serebrjakov Prikladnye mnogoagentnye sistemy gruppovogo upravlenija [Applied multi-agent group management systems]. - Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij [Artificial intelligence and decision making], 2.2009 g.;
6. Evologics [WWW access] - <https://evologics.de/>;
7. Aquatec [WWW access] -<http://www.aquatecgroup.com/19-solutions/179-acoustic-co>
8. Sonardyne [WWW access] - <https://www.sonardyne.com/product/ranger-2-subsea-positioning-usbl/mcommunication>;
9. Laboratorii podvodnoj svjazi i navigacii [WWW access] - <https://unavlab.com/>;
10. Develogic [WWW access] - <http://www.develogic.de/>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Григорьевич Михлин, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: valeriy_mikhlin@mail.ru

Николай Николаевич Семенов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: semenov@smtu.ru

Елена Борисовна Михлина, старший преподаватель, заместитель начальника управления, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: elena_mikhlina@mail.ru

Valeriy G. Mikhlin, Ph.D.(Eng), Assistant Professor, Associate Professor of the Department of **ship design**, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: valeriy_mikhlin@mail.ru

Nikolai N. Semenov, Ph.D.(Eng), Assistant Professor, Associate Professor of the Department of Marine Information Systems and Technologies, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: semenov@smtu.ru

Elena B. Mikhlina, Senior Lecturer, Deputy Head of Scientific Department, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: mikhlina@smtu.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.033

УДК 681.883 : 519.2

Выбор порога селекции сигнала по уровню в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом

С.Б. Егоров¹, Р.И. Горбачев¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Предложена вероятностная модель работы автономного обнаружителя на этапе ожидания сигнала, когда момент появления сигнала неизвестен и по этой причине решающая статистика, сравниваемая с порогом, формируется непрерывно во времени в режиме «скользящего окна». Ложная тревога в этом случае эквивалентна появлению хотя бы одного выброса помехового индикаторного процесса выше порога на максимально возможном интервале ожидания сигнала. Высота порога такова, что ложные выбросы являются редкими событиями, подчиняющимися закону Пуассона. На основе такой вероятностной модели показано, что вероятность ложной тревоги равна среднему числу ложных выбросов на максимально возможном интервале ожидания сигнала. Для обнаружителей с нормализованным индикаторным процессом получены соотношения, определяющие порог селекции сигнала по заданной вероятности ложной тревоги на заданном максимально возможном интервале ожидания сигнала. Показано, что в определении порога важную роль играет средняя квадратичная частота флуктуаций помехового индикаторного процесса. Дана численная оценка увеличения порога по сравнению с его значением, определенным по вероятности ложной тревоги «в точке». Показано, что определение порога по предложенной методике особенно актуально для обнаружителей, работающих в длительном автономном режиме.

Ключевые слова: обнаружение сигналов на фоне помех, автономный обнаружитель, статистическая модель обнаружителя, порог обнаружителя, селектор обнаружителя, индикаторный процесс обнаружителя, фильтрация ложных выбросов, селекция сигналов по уровню

Threshold of signal level selector in detectors with normalized indicator process

Stanislav B. Egorov¹, Roman I. Gorbachev¹¹State marine technical university of Saint-Petersburg

Abstract. This article proposes a probabilistic model of the autonomous detector in standby mode, when the moment of the signal appearance is unknown and for this reason the decisive statistics is generated continuously in time in the «sliding window» mode and compared with the threshold value. In this case, false alarm is equivalent to the appearance of at least one outlier of the jamming indicator process above the threshold at the maximum possible signal waiting interval. The threshold level match case when the false alarm are rare events and obey the Poisson law of distribution. Based on such a probabilistic model, we show that the probability of a false alarm is equal to the average number of false emissions at the maximum possible interval for a signal waiting. For detectors with a normalized indicator process, are obtained relations that determine the threshold for signal selection by a given probability of false alarm at a given maximum possible signal waiting interval. It is shown that in determining the threshold, the mean square frequency of fluctuations of the interference indicator process plays an important role. Also, a numerical estimate of the increase in the threshold is given compared with its value determined by the probability of false alarm «at a point». It is shown that the determination of the threshold by the proposed method is especially relevant for detectors operating in a long autonomous mode.

Keywords: signal detection in noise, autonomous detector, statistical model of detector, detector's threshold, threshold selector in detector, detector's indicator process, false-alarm filtering, detection of signals by level.

Введение

При оценке эффективности обнаружителя по критерию Неймана-Пирсона сохраняется традиция определять порог селекции сигнала по уровню u_0 при заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$ и известной условной плотности вероятности $W(u/H_0)$ решающей статистики – случайной величины. Порог определяется решением равенства

$$P_{\text{ЛТ}} = \int_{u_0}^{\infty} W(u/H_0) du \quad (1)$$

относительно u_0 [1, 2, 3, 4, 5].

Такая методика определения порога соответствует вероятностной модели работы обнаружителя, предполагающей принятие

обнаруженческого решения по единственному отсчету решающей статистики.

Реальные условия работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала (когда справедлива гипотеза H_0 о его отсутствии) отличается тем, что время ожидания, как правило, значительно превышает длительность сигнала и время появления сигнала на возможном интервале ожидания не известно.

В таких условиях, чтобы не пропустить сигнал, решающая статистика формируется в обнаружителе непрерывно во времени в режиме «скользящего окна», превращаясь в случайный процесс, текущие значения которого непрерывно сравниваются с порогом u_0 в индикаторном устройстве – пороговом устройстве компараторного типа. Такой процесс получил название «индикаторный» [5].

Согласно правилу принятия обнаруженческого решения первый же (после начала ожидания) флюктуационный выброс помехового индикаторного процесса выше порога u_0 , «ложный выброс», будет принят за сигнал и, если нет дополнительного контроля сигнала по другим признакам, произойдет ложная тревога.

Чтобы вероятность ложной тревоги была мала, порог u_0 устанавливают достаточно высоким, поэтому ложные выбросы помехового индикаторного процесса являются редкими во времени событиями.

Указанные условия работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала должны быть отражены в соответствующей вероятностной модели и порог селекции сигнала по уровню должен выбираться на основании этой модели. Цель настоящей работы является разработка вероятностной модели и методики определения порога на его основе.

Вероятностная модель работы обнаружителя при непрерывном контроле текущих значений помехового индикаторного процесса

Рассмотрим укрупненную структуру обнаружителя, состоящую из двух функциональных звеньев: формирователя решающей статистики (ФРС), работающего в режиме «скользящего окна», и индикаторного устройства, в котором находится только селектор сигнала по уровню (СУ) – пороговое устройство компараторного типа с порогом чувствительности u_0 (рис. 1).

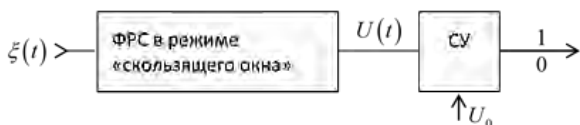


Рис. 1 – Структура обнаружителя: ФРС – формирователь решающей статистики, в режиме «скользящего окна»; СУ – селектор сигнала по уровню

Помеховый процесс $\xi(t)$ на входе ФРС полагаем стационаризованным. На выходе ФРС образуется случайный стационарный помеховый индикаторный процесс $u(t)$. В процедуру формирования текущих значений процесса $u(t)$ (решающей статистики) входит накопление преобразованных мгновенных значений процесса $\xi(t)$. Если интервал формирования решающей статистики значительно превышает интервал корреляции преобразованного процесса $\xi(t)$, текущие значения процесса $u(t)$ нормализуются.

Из условий работы обнаружителя известна длительность T_0 максимально возможного времени ожидания сигнала. При принятии решения по первому ложному выбросу отсутствие ложной тревоги на интервале ожидания T_0 эквивалентно неоявлению ни одного ложного выброса на этом интервале. Следовательно, если известна вероятность неоявления ни одного ложного выброса $P(0)$ на интервале T_0 , то вероятность появления

хотя бы одного выброса является вероятностью ложной тревоги и определяется равенством

$$P_{\text{ЛТ}} = 1 - P(0). \tag{2}$$

Так как величина $P_{\text{ЛТ}} \ll 1$, то значение $P(0)$ должно быть близко к единице, что возможно, когда ложные выбросы на интервале T_0 – редкие во времени события. Тогда вероятность появления различного числа ложных выбросов на интервале T_0 определяется законом Пуассона [6]. В частности, вероятность неоявления ни одного редкого события на интервале T_0 равна:

$$P(0) = e^{-N} = e^{-\nu T_0}, \tag{3}$$

где N – среднее число редких событий на интервале T_0 , $\nu = \frac{N}{T_0}$ – средняя частота появления редких событий на этом интервале.

Следовательно, вероятность ложной тревоги на интервале ожидания сигнала T_0 при непрерывном контроле помехового индикаторного процесса определяется выражением

$$P_{\text{ЛТ}} = 1 - e^{-N_0}, \tag{4}$$

где N_0 – среднее число ложных выбросов на интервале ожидания сигнала T_0 .

При e^{-N_0} , близком к единице, показатель степени N_0 мал и допустимо приближении (при $N_0 \leq 0.1$)

$$e^{-N_0} \approx 1 - N_0.$$

Из этого следует, что при условии $P_{\text{ЛТ}} \leq 0.1$, типичном для практики применения обнаружителей, **вероятность ложной тревоги с приемлемой точностью равна среднему числу ложных выбросов на интервале ожидания сигнала**

$$P_{\text{ЛТ}} \approx N_0 = \nu T_0. \tag{5}$$

Порог селекции сигнала по уровню в обнаружителях с нормализованным помеховым индикаторным процессом

В теории выбросов случайных процессов определяется средняя частота переходов текущих значений процесса через уровень u_0 с положительной производной, т.е. средняя частота выбросов любой длительности выше порога u_0 .

Для нормального стационарного случайного процесса средняя частота таких выбросов определяется выражением [7]

$$\nu(u_0) = f_u \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{u_0 - m_u}{\sigma_u}\right)^2\right), \tag{6}$$

где m_u, σ_u, f_u – соответственно математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение и средняя квадратичная частота флюктуаций.

Средняя квадратичная частота флюктуаций процесса связана с его нормированной автокорреляцией $R_u(\tau)$ соотношением [7]

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-R_u''(0)}.$$

Введем обозначение

$$k_0 = \frac{u_0 - m_u}{\sigma_u} \quad (7)$$

и назовем k_0 «пороговым коэффициентом по уровню». Тогда из (7) порог селекции по уровню определяется равенством

$$u_0 = m_u + k_0 \sigma_u. \quad (8)$$

Подставив (7) в (6) и решив уравнение

$$v = f_u e^{-\frac{k_0^2}{2}}$$

относительно k_0 , получим его величину:

$$k_0 = \sqrt{2 \ln \left(\frac{f_u}{v} \right)}. \quad (9)$$

Используя (5) выразим величину порогового коэффициента через заданную вероятность ложной тревоги

$$k_0 = \sqrt{2 \ln \left(\frac{f_u T_0}{P_{\text{ЛТ}}} \right)}. \quad (10)$$

Следовательно, порог селекции сигнала по уровню, обеспечивающий заданную вероятность ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$ на известном максимально возможном интервале ожидания сигнала T_0 , в случае нормализованного помехового индикаторного процесса определяется выражением:

$$u_0 = m_u + \sigma_u \sqrt{2 \ln \left(\frac{f_u T_0}{P_{\text{ЛТ}}} \right)}. \quad (11)$$

Сравнение порогов селекции сигнала по уровню, определяемых по двум методикам

В случае нормализации решающей статистики условная плотность вероятности ее величины или мгновенного значения стационарного помехового индикаторного процесса в любой момент времени определяется функцией Гаусса

$$W(u/H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u - m_u}{\sigma_u} \right)^2 \right),$$

а вероятность ложной тревоги «в точке» согласно (1) – выражением

$$P_{\text{ЛТ}} = 1 - \Phi \left(\frac{u_0 - m_u}{\sigma_u} \right), \quad (12)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

– интеграл вероятности Лапласа.

Вводя в (12) пороговый коэффициент (7) и решая уравнение

$$P_{\text{ЛТ}} = 1 - \Phi(k_0)$$

относительно k_0 , получаем известную его зависимость от $P_{\text{ЛТ}}$:

$$k_0 = \arg(\Phi(1 - P_{\text{ЛТ}})) \quad (13)$$

и алгоритм формирования порога, обеспечивающий эту вероятность:

$$u_0 = m_u + \sigma_u \arg(\Phi(1 - P_{\text{ЛТ}})). \quad (14)$$

Сравним величины k_0 , полученные по двум методикам для одинаковых значений $P_{\text{ЛТ}}$.

Согласно (13) для определения k_0 по традиционной методике необходима только вероятность ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$ «в точке». Для определения k_0 по предлагаемой методике согласно (10) необходимо задать величины T_0 и f_u (их произведение).

В обнаружителях с нормализованным помеховым индикаторным процессом средняя квадратичная частота его флюктуаций определяется выражением [8]

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\tau_k \tau_u}}, \quad (15)$$

где τ_k – эквивалентная длительность нормированной автокорреляции преддетекторного процесса; τ_u – постоянная времени последдетекторного НЧ-фильтра.

В различных обнаружителях величина f_u принимает значения от единиц до нескольких десятков герц. В нашем расчете примем $f_u = 10$ Гц. Максимально возможное время ожидания T_0 в зависимости от условий использования обнаружителей меняется в широких пределах – от десятков секунд – до десятков миллионов секунд.

Заключение

В таблице приведены значения порогового коэффициента k_0 при $f_u = 10$ Гц и нескольких значениях времени ожидания сигнала T_0 : 10 с, 3600 с (час), 86400 с (сутки), $26 \cdot 10^5$ (один месяц) и $31 \cdot 10^6$ с (один год). В первой строке таблицы приведены значений k_0 при $P_{\text{ЛТ}}$ «в точке».

Данные из таблицы показывают, что учет реальных условий работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала приводит к значительному повышению порога селекции сигнала по уровню по сравнению с порогом для $P_{\text{ЛТ}}$ «в точке». Следовательно, **именно такой порог надо использовать при оценке эффективности обнаружителя по критерию Неймана-Пирсона.**

Из таблицы также видно, что с ростом времени ожидания порог становится недопустимо велик с точки зрения загробления обнаружителя, что приводит к **необходимости привлечения дополнительных признаков сигнала для принятия обнаруженческих решений.**

Таблица 1

Значения порога селекции сигнала по уровню			
$f_u \cdot T_0$	P_{AT}		
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
«в точке»	1.28	2.33	3.1
10^2	3.72	4.29	4.8
$36 \cdot 10^3$	5.06	5.49	5.9
$864 \cdot 10^3$	5.65	6.04	6.41
$26 \cdot 10^6$	6.22	6.58	7.25
$31 \cdot 10^7$	6.61	6.95	7.73

Литература

1. Мидлтон Д. Статистическая теория обнаружения сигналов. В сб. статей Прием сигналов при наличии помех. М.: ИЛ, 1960.
2. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1973.
3. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Сов. Радио, 1978.
4. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем. Л.: Судостроение, 1988.
5. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Том 1. СПб: "Концерн ЦНИИ Электроприбор", 2009.
6. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1974.
8. Егоров С.Б. Энергетические обнаружители шумовых акустических сигналов. СПб: СПбГМТУ, 2016.

References

1. Middleton D. Statistical theory of signal detection. Trans. IRE, Vol. IT-3, 1954. pp. 26-51.
2. Ol'shevskij V.V. Statisticheskie metody v gidrolokacii [Statistical methods in hydrolocation]. L.: Sudostroenie, 1973.
3. Sosulin Y.G. Teoriya obnaruzheniya i ocenivaniya stohasticheskikh signalov [Stochastic signals detection and estimation theory]. M.: Sov. Radio, 1978.
4. Burdic W.S. Underwater Acoustic System Analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.
5. Mal'yshkin G.S. Optimal'nye i adaptivnye metody obrabotki gidroakusticheskikh signalov [Optimal and adaptive methods of hydroacoustic signals processing]. SPb: Konzern CzNII "E'LEKTROPRIBOR", 2009.
6. Hudson D.J. Lectures on Elementary Statistics and Probability. Geneva: CERN, 1964.
7. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical basics of statistical radio engineering]. M.: Sov. Radio, 1974.
8. Egorov S.B. Energeticheskie obnaruzhiteli shumovykh akusticheskikh signalov [Energy detectors of noise acoustic signals]. SPb: SPbGMTU, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Станислав Борисович Егоров, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Stanislav B. Egorov, Ph.D. (Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: Stanislav.Egorov.1938@gmail.com

Роман Игоревич Горбачев, аспирант кафедры морских информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

Roman I. Gorbachev, PhD-student (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: gorbatschow.r@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.072

УДК 621.316.97

Обеспечение электромагнитной совместимости систем интеллектуального управления при появлении помех в судовых кабельных трассах

А.М. Агафонов¹, А.А. Воршевский¹, П.А. Воршевский¹, Е.С. Гришаков¹, А.С. Корнев¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Системы интеллектуального управления базируются на использовании цифровой техники и по своему принципу действия восприимчивы к внешним помехам. Изменения напряжения и тока в кабелях, электромагнитные поля могут привести к появлению в цепях передачи информации и питания систем напряжений, похожих на полезные сигналы, что приведет к сбоям в работе систем. Технология электромагнитной совместимости (ЭМС) призвана устранить взаимные влияния оборудования и обеспечить его нормальную работу в условиях действия помех. Кабельные трассы являются особенно значимым фактором для обеспечения ЭМС на судах. Помехи распространяются в кабелях от источников к чувствительному электронному оборудованию (ЭО). Метод распространяющихся волн дает возможность рассчитать изменения помех при распространении по кабелям. Силовые и информационные кабели могут прокладываться в одной трассе, что приводит к их электромагнитной связи. Рассмотренные модели оценивают наведенные напряжения в информационных кабелях при появлении помех в силовых кабелях. Параметры электромагнитной связи кабелей могут быть определены расчетным путем и экспериментально на основе предлагаемой методики. Приведенные рекомендации по снижению уровня излучаемых помех от кабельных трасс, снижению наведенных напряжений и выполнению экранирования призваны помочь разработчикам ЭО и систем в обеспечении ЭМС.

Ключевые слова: Электромагнитная совместимость, помеха, электронное оборудование, кабель, кабельная трасса, система управления, защита от помех

Electromagnetic compatibility obtaining of intellectual control systems under electromagnetic interference in shipboard cable runs

Alexey M. Agafonov¹, Alexander A. Worshevsky¹, Petr A. Vorshevskii¹, Evgenii S. Grishakov¹, Alexander S. Kornev¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Intellectual control systems are based on digital technique. Digital electronic equipment (EE) is the receptor of electromagnetic interference due to its function principle. EE malfunction can be caused by induced voltages in input/output and power supply circuits. Voltage and current changes in cables leads to electromagnetic noise and induced voltages. Protection technique for power, input/output, case and grounding ports can be used in equipment and ship systems design. Electromagnetic compatibility technique must eliminate mutual influence of EE and give normal function of EE in real electromagnetic environment. Cable run is important factor for EMC obtaining in ships. Noise voltage propagates in cable from noise source to sensitive EE. Voltage parameters can be calculated with travelling wave technique. There are power and information cables in shipboard cable run. Electromagnetic coupling of cables leads to voltages in one cable induced by voltages and current in other cable. Coupling models give possibility to calculate induced voltages. Parameters of coupling can be determined with calculation on the base of detailed information about cable run or with proposed experiment procedure. Proposed recommendations about cable emission decreasing, cables decoupling and shielding can be useful for EMC obtaining.

Key words: Electromagnetic compatibility, interference, electronic equipment, cable, cable run, control system, interference protection.

Введение

Международная морская организация в документе ИМО А.813(19) ставит задачу обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) систем и оборудования в условиях судовой электромагнитной обстановки. Российский морской регистр судоходства регламентирует требования по ЭМС, предусматривающие проведение испытаний судового оборудования на помехоустойчивость в лаборатории и измерений создаваемых оборудованием помех с целью проверки соответствия нормам. После установки на судно контролируется только эмиссия помех на ходовом мостике и антенной площадке. Между тем на судне появляются дополнительные электромагнитные

связи оборудования и систем через кабельные трассы. Для обеспечения ЭМС систем на судне необходимо учитывать эти пути воздействия помех. Непрерывный рост мощности судовых электротехнических устройств, повышение чувствительности и расширение использования бортовых средств вычислительной техники обостряют проблему ЭМС на судах.

1. Возникновение помех в кабелях

Любое судовое техническое средство (электронное, электротехническое, радиотехническое оборудование, средства автоматизации и навигации) при включении, выключении и работе может создавать токи, напряжения, электромагнитные поля, способные

влиять на другое оборудование. Теоретически любое средство является источником помех, уровень которых зависит от принципа действия и особенностей его конструкции. Полезный сигнал основного оборудования может быть помехой другому. На практике под источниками помех подразумевают техническое средство или процессы, создающие уровни помех, значимые для судового оборудования [1]. На судах можно выделить следующие значимые источники помех:

- работа полупроводниковых преобразователей электроэнергии, которая дает наибольшее число видов помех; принцип действия преобразователей основан на периодическом переключении цепей, что сопровождается периодическими изменениями тока, напряжения и электромагнитного поля;
- включение потребителей электроэнергии, приводящее к созданию отклонений питающего напряжения и импульсным помехам в электроэнергетической системе;
- включение конденсаторов, создающее импульсные помехи;
- выключение индуктивных цепей, которое сопровождается появлением перенапряжений и импульсных помех;
- аварийные процессы, такие как однофазные замыкания на корпус, способные создать импульсные помехи и перенапряжения во всей электроэнергетической системе;
- работа коллекторных электродвигателей, сопровождаемая переключением обмоток ротора, что создает помехи в широком диапазоне частот;
- люминесцентные лампы, создающие импульсные помехи при зажигании и широкополосный электромагнитный шум, связанный с особенностью газового разряда, происходящего в лампе при горении;
- компьютеры, цифровые устройства обработки информации, при своей работе генерирующие широкополосные помехи;
- работа радиооборудования, сопровождаемая созданием узкополосных помех;
- разряды статического электричества с человека на оборудование, которые являются особым видом помех;
- внешние радиолокационные станции, разряды молнии, способные нанести импульсные помехи большой амплитуды.

Наиболее значимыми для цифровой техники являются импульсные помехи, которые по своим параметрам близки к полезным цифровым сигналам. Такие помехи способны проникать в цепи питания микросхем и цепи передачи информации и приводить к сбоям в работе систем управления. Максимальная амплитуда импульсных помех в точке возникновения в судовой электрической сети может превышать 1 кВ при коммутации обычных конденсаторов. Длительность импульсов может быть менее 5 нс при общей длительности 10^{-1} - 10^2 с.

2. Распространение помех по кабелям

При возникновении в точке коммутации импульсной помехи (скачка напряжения и тока) напряжение в остальных точках электроэнергетической системы (ЭЭС) еще остается неизменным. От точки коммутации по кабелям

движется волна напряжения и тока, параметры распространения которых определяются числом, взаимным расположением, материалом и размерами жил кабеля, их удаленностью от корпуса и материалом изоляции. Скорость движения волн составляет 150–200 м/мкс. Распространение помех в кабельной трассе может быть сведено к распространению волн по линиям (волновым каналам), под которыми понимается пара проводников или проводник над корпусом. Линию можно представить в простейшем случае в виде цепи, состоящей из LC ячеек. Параметры L и C представляют соответственно индуктивность и емкость на единицу длины линии.

Отношение напряжения к току распространяющейся волны называется волновым сопротивлением $Z = u_1/i_1$. То есть мгновенные значения напряжения и тока волны в линии связаны через волновое сопротивление Z по формуле

$$i = \frac{u}{Z}. \quad (1)$$

Если не учитывать потери при распространении, то волновое сопротивление Z и скорость распространения v в линии (волновом канале) определяются по формулам:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad v = \frac{v_c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}, \quad v_c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}},$$

где L и C – соответственно погонные индуктивность и емкость линии (параметры на единицу длины); μ_r , ϵ_r – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости материала, расположенного между проводниками, $\epsilon_0 = 8,85415 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $v_c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Величина Z зависит от геометрии линии и материала изоляции, для судовых кабелей она составляет 50–200 Ом [1]. Формулы для расчета LC-параметров по геометрическим данным проводников и изоляции кабелей, высоте прокладки приведены в [1, 2]. Влияние соседних кабелей на параметры распространения рассмотрено в [3].

При распространении волны по линии ее энергия частично расходуется в проводнике и диэлектрике, причем потери для отдельных частотных составляющих волны различны, что приводит к различию в скорости их распространения и к искажению фронта импульсной волны. Если длина кабеля составляет несколько десятков метров, то длительность фронта импульса напряжения на дальнем конце растягивается до 0,1 мкс, а амплитуда помех малой длительности (менее 0,1 мкс) уменьшается. Амплитуда импульсов напряжения длительностью свыше 1 мкс практически не изменяется.

Расчет напряжения помехи в интересующей точки сети может быть выполнен методом распространяющихся (бегущих) волн, в котором напряжение в заданной точке находится суммированием всех проходящих через точку волн.

Напряжение на нагрузке R_H в конце кабеля определяется формулой:

$$u_H = \frac{2R_H u}{R_H + Z}.$$

Возможно удвоение напряжения при $R_H \gg Z$. Например, если волна с амплитудой $U = 1000$ В, распространяясь по кабелю с волновым сопротивлением $Z = 100$ Ом, падает на трансформатор с волновым сопротивлением $R_H = 10000$ Ом, то напряжение на трансформаторе близко к 2000 В.

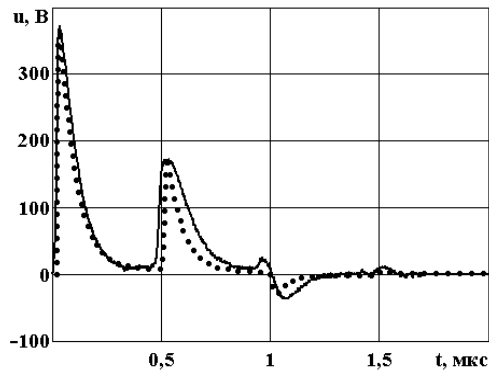
Сравнение расчета изменения напряжения на ближнем и дальнем конце кабеля при воздействии импульсной помехи амплитудой 370 В и эксперимента для реального кабеля длиной 50 м и условия $R_H \gg Z$ представлены на рис. 1. Действительно, амплитуда импульсной помехи на конце кабеля значительно превышает амплитуду исходной помехи, распространяющейся по кабелю.

Если на конце линии стоит LC фильтр на элементах L_F, C_H , то напряжение на конденсаторе фильтра при падении на фильтр волны U и при условии $Z < 2\sqrt{L_F / C_H}$ изменяется по колебательному закону. Амплитуда напряжения на конденсаторе при определенных условиях может приближаться к четырем амплитудам падающей волны, т.е. неправильно выбранный фильтр может ухудшить помехозащищенность ЭО.

Многочисленные отражения волн напряжения помехи, возникающей при включении конденсатора на щите, могут дать импульсные перенапряжения на конце кабеля, многократно превышающие напряжение электропитания.

Для правильной оценки воздействия помех через кабельные трассы необходимо учитывать эффекты распространения помех по кабелям.

а)



б)

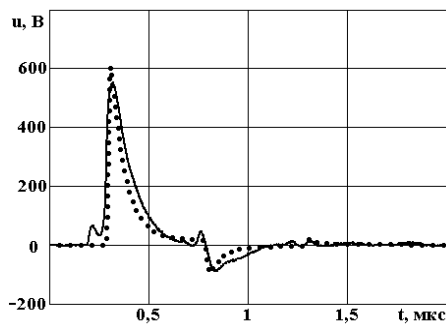


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (сплошные линии) в начале кабеля КМПВЭ 7х2,5 длиной 50 м (а) и в его конце (б) и результаты расчета (точки).

3. Возникновение наведенных напряжений в кабельной трассе

В судовых кабельных трассах силовые кабели могут прокладываться совместно с информационными. Это обусловлено большим количеством кабелей, дефицитом места, трудностью размещения на судне многих отдельных трасс.

Силовые кабели внутри судна могут нести напряжение и токи несимметричных (u_1, i_1) и симметричных (u_{11}, i_{11}) помех. Напряжение создает электрическое поле, а ток – магнитное поле, которые вызывают наведенные напряжения в соседнем кабеле (рис.2). Воздействие электромагнитного поля силового кабеля на информационный может рассматриваться как передача напряжений и токов через электромагнитные связи кабелей в трассе. Для расчета наведенных наносекундных помех необходимо использовать схемы с распределенными параметрами. В наиболее общей форме расчет можно провести на основе рассмотрения кабельной трассы как многопроводной линии [4].

Расчет наведенных микросекундных импульсных помех и приближенная оценка других наведенных помех может выполняться на основе схем со сосредоточенными параметрами [1].

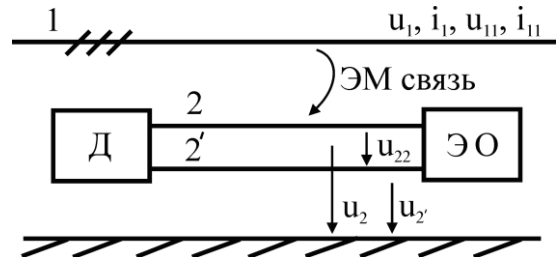


Рис.2. Электромагнитные связи цепей в кабельной трассе: 1 – силовой кабель; 2, 2' – проводники кабеля, соединяющие датчик (Д) и электронное оборудование (ЭО)

Проводник 1 (рис.3), находящийся под напряжением u_1 относительно корпуса, создает электрическое поле с напряженностью E . На проводнике 2, находящемся в электрическом поле, наводится напряжение u_2 , пропорциональное напряженности поля и высоте проводника над корпусом судна. Поле проводника 1 неравномерное. Поэтому для расчета u_2 необходимо знать конфигурацию поля, изменение напряженности по высоте. Более удобным является представление электрической связи цепей как емкостной связи. Воздействие электрического поля эквивалентуется емкостью между проводниками C_{12} и емкостью проводника C_2 относительно корпуса. Величины емкостей на единицу длины можно определить на основе выражений, приведенных в [1, 2]. Напряжение на проводнике 2 может быть рассчитано по формуле

$$u_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} u_1$$

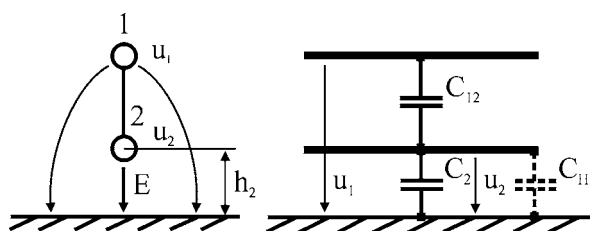


Рис.3. Электрическая (емкостная) связь двух цепей в кабельной трассе

Проводник с током несимметричных помех i_1 создает магнитное поле, изменение которого наводит ЭДС e_2 в контуре, образованном проводником 2 и корпусом (рис.4):

$$e_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt},$$

где M_{12} – взаимная индуктивность контура, образованного проводником 1 и корпусом с контуром, образованным проводником 2 и корпусом.

Значение M_{12} зависит от геометрического расположения контуров и длины совместной прокладки кабелей и может быть определено по формулам, приведенным в [1].

Симметричные токи (протекающие по проводникам в противоположных направлениях) и напряжения (приложенные между проводниками) создают значительно меньшие электрические и магнитные поля, а значит и меньшие наведенные напряжения.

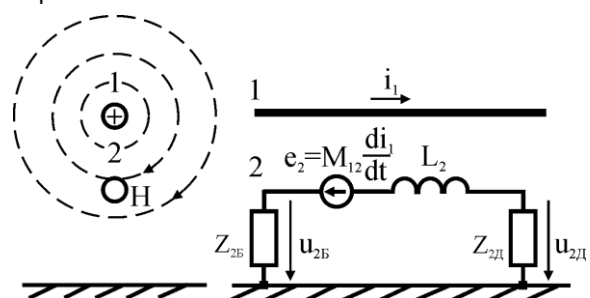


Рис.4. Магнитная (индуктивная) связь двух цепей в кабельной трассе

Наведенное напряжение u_2 снижается при уменьшении длины совместной прокладки, увеличении расстояния между кабелями и при прокладке кабелей на минимальной высоте.

Несимметричные помехи u_2 частично преобразуются в симметричные u_{22} из-за несимметрии выбранной для передачи информации пары жил кабеля и неравенства входных сопротивлений цепей ЭО относительно корпуса. Напряжение u_{22} определяется как разность напряжений, наведенных на проводниках пары жил. Все симметричные напряжения, действующие между зажимами ввода, воспринимаются ЭО как полезный сигнал.

Экранированные кабели широко используются на судах для передачи сигналов низкого уровня. В большинстве случаев экраны кабелей выполнены в виде оплетки. Использование экранированных

кабелей позволяет радикально снизить наведенные напряжения.

Металлическая оплетка дает возможность на 2–3 порядка снизить электрическое поле и соответственно наведенное напряжение, обусловленное емкостной связью, при условии соединения оплетки с корпусом. Емкость C_{12} между проводниками 1 и 2, характеризующая проникновение поля внутрь экрана, значительно меньше для экранированного кабеля и не равняется нулю только из-за наличия окон в оплетке и участков кабеля со снятым экраном. При отсутствии соединения экрана с корпусом наведенное напряжение мало меняется по сравнению с неэкранированными кабелями.

Применение кабеля со сплошным заземленным экраном при условии уменьшения длины участков со снятым экраном обеспечивает минимальное наведенное напряжение.

Импульсный ток i_1 в кабеле 1 может навести в экране кабеля 2 ток i_s , который может достигать $0,3i_1$ при прокладке кабелей вплотную по корпусу.

Импульсный ток в экране создает импульсное наведенное напряжение, которое может быть оценено по формуле:

$$u_2 < M_{s2} \frac{di_s}{dt} + R_s i_s,$$

где M_{s2} – взаимная индуктивность экрана и внутренних проводников кабеля 2, R_s – активное сопротивление экрана (оплетки) этого кабеля.

Для судовых кабелей взаимная индуктивность экрана и внутренних проводников может составлять 0,1–50 нГн/м, а сопротивление оплетки 0,5–50 мОм/м. Наилучшим экраном кабеля является сплошная медная труба, у которой $M_{s2} = 0$, а R_s минимально.

4. Измерения электромагнитных связей кабелей

Параметры электромагнитных связей кабелей в трассе предлагается измерять путем создания импульсных напряжений и токов в одном кабеле, снятия осциллограммы наведенного напряжения в другом кабеле (рис. 5, 6) и расчета параметров по определенным формулам.

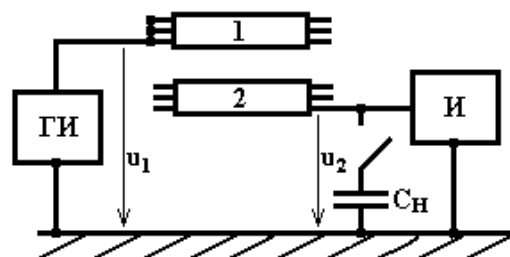


Рис.5. Измерение емкостной связи кабелей

Емкость связи C_{12} определяется на основе результатов измерения осциллографом амплитуды U_1 импульса, создаваемого в цепи 1 генератором ГИ, и амплитуды напряжения, наведенного в цепи 2 относительно корпуса при подключенном и отключенном эталонном конденсаторе емкостью C_H (соответственно U'_2 и U_2).

$$C_{12} = \frac{C_H}{\frac{U_1}{U_2^*} - \frac{U_1}{U_2}}, \quad C_2 = C_{12} \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) - C_0,$$

где C_0 - емкость щупа осциллографа.

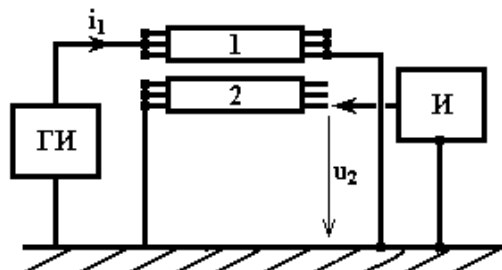


Рис. 6. Измерение индуктивной связи кабелей

Взаимная индуктивность M_{12} несимметричных цепей определяется по результатам измерения максимальной скорости изменения импульсного тока $(di_1/dt)_m$, создаваемого в цепи 1 генератором ГИ, и амплитуды напряжения U_2 , наведенного в цепи 2 относительно корпуса.

$$M_{12} = \frac{U_2}{\left(\frac{di_1}{dt} \right)_m}$$

5. Методы и средства обеспечения ЭМС в кабельных трассах

При проведении работ по обеспечению ЭМС систем рекомендуется использовать ниже перечисленные принципы.

Снижение уровня излучаемых помех от кабельных трасс:

- экранирование кабелей с импульсными токами и напряжениями;
- компенсация магнитных потоков за счет скручивания жил кабеля;
- заземление экранов кабелей по всему периметру, снижение индуктивности заземления;
- уменьшение полного сопротивления заземляющих шин;
- уменьшение площади контура излучения помех за счет уменьшения длины кабелей до необходимого размера;
- размещение кабелей как можно ближе к заземленным элементам конструкции. При подъеме кабелей от заземленных элементов конструкции более чем на 35 мм индуктивность кабелей близка к значению индуктивности линии в свободном пространстве;
- экранирование силовых цепей с применением материалов с частотно-зависимыми свойствами на основе высокочастотных ферритов, имеющих форму

эластичных лент, прокладок и т.п., ослабляющих на 40-60 дБ электромагнитные поля в частотном диапазоне от единиц до сотен МГц.

Снижение наведенных помех:

- запрещение параллельной прокладки кабелей с разными уровнями сигнала;
- увеличение длительности фронтов передаваемых сигналов;
- размещение между параллельно проложенными кабелями заземленных проводников;
- применение коаксиальных кабелей, витых пар, уменьшение площади контура и снижение значений паразитных параметров сигнальных кабелей.

Экранирование кабелей

Основным требованием к заземлению экранов кабелей является обеспечение минимального сопротивления заземления, что достигается, когда экран кабеля охватывается жесткой металлической скобой на 360°. Заземление экрана кабеля производится только с одной стороны. Это предотвращает протекание по экрану токов, обусловленных разностью потенциалов различных точек заземления. Исключения составляют кабели небольшой длины. Для длинных экранированных кабелей рекомендуется двухточечное заземление, с одной стороны экран заземляется непосредственно на общую шину заземления изделия, с другой стороны заземление экрана осуществляется через высоковольтный конденсатор малой емкости.

Силовые и информационные кабельные трассы должны прокладываться на возможно большем расстоянии друг от друга. Уровень наведенных помех снижается более чем в 10 раз при увеличении расстояния до 0,3 м в для прокладки кабельных трасс на кабельных подвесах или увеличении расстояния до 0,1 м для случая прокладки кабелей по заземленной поверхности.

Наиболее эффективной мерой обеспечения ЭМС в судовой кабельной трассе является применение волоконно-оптических линий связи.

Заключение

Для обеспечения ЭМС систем на судах необходимо принимать во внимание воздействия помех через кабели в судовой кабельной трассе.

Параметры электромагнитной связи кабелей, необходимые для расчета распространения помех в кабельных трассах, отсутствуют в технической документации электротехнических кабелей. Предлагается рассчитывать эти параметры на основе приведенного подхода или измерять параметры описанным методом.

Рассмотренные методы и средства обеспечения ЭМС в кабельных трассах могут непосредственно применяться разработчиками судового электронного оборудования и систем.

Литература

1. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств: СПбГМТУ. – СПб., 2010 - 317 с.
2. Tesche F., Ianoz M., Karlson T. EMC analysis methods and computational models. — New York: Wiley, 1997. — 623 p.
3. Ахрестин М. А. Определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения импульсных помех, и оценка погрешности расчета / М. А. Ахрестин, А. А. Воршевский, П. А. Воршевский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 582–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11- 3-582-591.

4. Paul C. R. Analysis of multiconductor transmission lines. — New York: Wiley, 1994. — 584 p.

References

1. Worshevsky A.A., Gal'perin V.E. Elektromagnitnaya sovmestimost' sudovyh tekhnicheskikh sredstv [Electromagnetic compatibility of ship equipments]. SPBGMTU. — SPb., 2010 - 317 s.
2. Tesche F., Ianoz M., Karlson T. *EMC analysis methods and computational models*. New York: Wiley, 1997.
3. Akhrestin M.A., Vorshevskii P.A., Worshevsky A.A. Opredelenie parametrov sudovyh kabelej, neobhodimyh dlya rascheta rasprostraneniya impul'snyh pomekh, i ocenka pogreshnosti rascheta [Determination of shipboard cables parameters for calculating the pulse noise propagation and calculation accuracy estimation]. Vestnik GUMRF. — 2019. — v. 11. — 3. — p. 582–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11- 3-582-591.
4. Paul C.R. Analysis of multiconductor transmission lines. New York: Wiley, 1994.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Михайлович Агафонов, старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kws@smtu.ru

Александр Алексеевич Воршевский, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3 e-mail: elemcom@smtu.ru

Петр Александрович Воршевский, старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования судов Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3 e-mail: elemcom@smtu.ru

Евгений Сергеевич Гришаков, инженер 2 категории кафедры электротехники и электрооборудования судов Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3 e-mail: grishakove@mail.ru

Александр Сергеевич Корнев, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3 e-mail: alex_kornev46@mail.ru

Alexey M. Agafonov, Senior lecturer of department Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships State marine technical university of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: kws@smtu.ru

Alexander A. Worshevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor of department Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships State marine technical university of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: elemcom@smtu.ru

Petr A. Vorshevskii, Senior lecturer of department Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships State marine technical university of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: elemcom@smtu.ru

Evgenii S. Grishakov, Engineer 2nd category of department Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships State marine technical university of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation e-mail: grishakove@mail.ru

Aleksandr S. Kornev, Dr. Sci. (Eng.), Professor State Marine Technical University of Saint-Petersburg Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: alex_kornev46@mail.ru

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.049
УДК 004.942:004.031.043

Комплекс физико-математического моделирования при функционировании мультиагентных систем

Ю.И. Нечаев¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассматривается повышение эффективности функционирования мультиагентных систем при использовании программного комплекса физико-математического моделирования (ФММ). Функциональные элементы комплекса обеспечивают контроль экстремальных ситуаций на основе динамической модели современной теории катастроф (СТК), интегрирующей интеллектуальных технологии и высокопроизводительные вычисления. Особенности построения комплекса связаны с развитием новых подходов к физико-математическому моделированию динамики сложных систем в эволюционирующей среде. Вычислительная среда эволюционной динамики представлена как активная динамическая система (АДС) на основе совокупности взаимодействующих интеллектуальных агентов (ИА) в среде мультиагентного моделирования (Multiagent Modeling System – MMS), обеспечивающей информационные и управляющие связи, реализующие модель коллективного интеллекта при взаимодействии ИА в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [1] – [5]. Модели контроля экстремальных ситуаций разрабатываются в рамках логического базиса нечеткой формальной системы (НФС). Приведены примеры реализации разработанной стратегии в бортовых интеллектуальных системах новых поколений.

Ключевые слова: программный комплекс, физико-математическое моделирование, мультиагентная система, режим экстренных вычисления, эволюционная динамика.

Complex for physical and mathematical modeling at the functioning of multi-agent systems

Yuri I. Nechaev¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. An increase in the efficiency of multi-agent systems is considered when using the software package for physical and mathematical modeling (FMM). The functional elements of the complex provide control of extreme situations on the basis of a dynamic model of modern catastrophe theory (MCT), integrating intelligent technologies and high-performance computing. Features of the complex construction are associated with the development of new approaches to the physical and mathematical modeling of the dynamics of complex systems in an evolving environment. The computing environment of evolutionary dynamics is presented as an active dynamic system (ADS) based on a set of interacting intelligent agents (IA) in a Multiagent Modeling System (MMS), which provides information and control communications that implement the collective intelligence model in the interaction of IA in urgent computing mode (Urgent Computing - UC). Models for controlling extreme situations are developed within the framework of the logical basis of the fuzzy formal system (FFS). Examples of the implementation of the developed strategy in the onboard intelligent systems of new generations are given.

Key words: software complex, physic-mathematic modeling, multi-agent system, urgent computing mode, evolutionary dynamics.

Введение

Информационная среда MMS динамики судна в условиях нестационарных возмущений обеспечивает построение концептуальных решений ФММ на базе динамической иерархической сети (рис.1), характеризующей фундаментальный результат интеграции достижений в области реализации перспективных направлений развития интеллектуальных технологий XXI века.



Рис. 1. Информационная среда MMS при интерпретации решений

Одна из особенностей информационной среды MMS – иерархическая организация как АДС, определяющая функции интерпретации и управления в условиях временных задержек, шума и неопределенности. Стратегическое планирование операций и концептуальных решений в условиях иерархической организации MMS представляется в виде отображения фундаментального результата интеграции компонент динамической модели СТК на базе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений [3].

Как следует из рис.1, среда MMS реализуется в виде двух подходов. Первый подход предусматривает использование ограниченного числа ИА с агентом-лидером. Второй основан на ассоциации многочисленных ИА, наделенных сравнительно слабыми функциональными возможностями при реализации общей стратегии поведения [4]. Одна из особенностей информационной среды MMS – иерархическая организация как АДС [4], определяющая функции интерпретации и управления в условиях временных задержек, шума и

неопределенности. Стратегическое планирование операций и концептуальных решений в условиях иерархической организации MMS представлена на основе первого подхода в виде отображения фундаментального результата интеграции компонент динамической модели СТК на базе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений [2].

Иерархическая модель позволяет описывать динамику взаимодействия судна с внешней средой на различных уровнях абстракции: отражения элементов, свойств, характеристик, определяющих функции интерпретации f и управления F в процессе развития текущей ситуации. При декомпозиции среды MMS реализуется концепция связности, при этом исходная модель представляется совокупностью моделей подуровней, связанных древовидным отношением. Формирование уровней иерархии осуществляется с помощью стандартных оснований декомпозиции. На любом уровне иерархии выделяются подсистемы MMS и взаимосвязи между ними, при этом обеспечивается уровень целого и не теряются уровни тончайшего анализа.

1. Интеллектуальный комплекс ФММ в среде MMS

Исследование динамики судна в среде MMS связано с широким использованием методов и средств моделирования. Технической базой моделирования является специализированный автоматизированный комплекс ФММ при выполнении гидроаэродинамических исследований [2]. Этот комплекс имеет многоуровневую иерархическую структуру с многокритериальным регулированием. Информационная база комплекса содержит специализированную базу знаний НФС, обеспечивающую моделирование нестационарной динамики при различных режимах взаимодействия и определение оценок характеристик динамики судна и текущих состояний комплекса.

Структура комплекса ФММ (рис. 2) обеспечивает восприятие нестационарных внешних воздействий, производит анализ параметров взаимодействия и оценку состояния исследуемого судна. Полученные данные передаются управляемую подсистему для воспроизведения моделей ФММ в пространствах поведения и управления СТК.

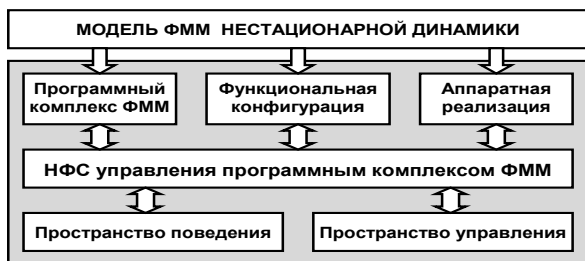


Рис. 2. Основной цикл управления интеллектуального комплекса ФММ

Важным элементом информационной базы ФММ является компонента, реализующая методы планирования эксперимента и теорию размерностей и подобия для обеспечения физического моделирования оценки генерируемых решений в условиях неопределенности.

Информационная база комплекса ФММ обеспечивает потоки информации в системе ППР, определяющую модели поведения судна и образ управляющей системы. Эффективность работы комплекса при выборе оптимальных условий обеспечивается на основе адаптивной системы управления для реализации поставленной цели. При формировании моделей поведения учитываются внешние управляющие воздействия и эталонный образ управляющей подсистемы комплекса ФММ, который представляет собой динамический процесс, характеризующий состояния основных подсистем комплекса при различных условиях эксперимента.

2. Общая характеристика интеллектуального комплекса ФММ

При практической реализации методов MMS (бортовые ИС, виртуальные полигоны и лаборатории) учитываются общие принципы и структура системы ППР, обеспечивающая на основе комплекса ФММ анализ и прогноз экстремальных ситуаций. Модели контроля экстремальных ситуаций разрабатываются в рамках логического базиса НФС и формализованных методов анализа и прогноза динамики взаимодействия судна на волнении. Разработанные теоретические принципы и концепция построения моделей обработки информации при контроле режимов функционирования программного комплекса ФММ позволяют представить интегрированную структуру среды MMS и выделить типичные задачи информационного обеспечения оператора:

$$Int(PS) = \{SA(MMS), FM, MC, IT, SPC\}, (1)$$

где SA(MMS) – системный анализ; FM – функциональная модель; MS – мультипроцессорная среда; IT – интеллектуальные технологии; SPC – структурные элементы программного комплекса.

Системный анализ при разработке программного комплекса ФММ на основе MMS. Системный анализ [4] обеспечивает исследование экстремальных ситуаций динамики судна в рамках междисциплинарного подхода:

$$SA(NNS) = \{PE, FS, CO, SD\}, (2)$$

где PE – многопредметность описания процесса взаимодействия судна с внешней средой при построении динамической базы знаний программного комплекса ФММ; FS – взаимосвязанные факторы, определяющие развитие экстремальной ситуации; CO – комплексная онтология, позволяющая получить развернутую картину состояния судна на волнении; SD – закон системной декомпозиции.

Сформулированные на основе (2) модели знаний направлены на целостное изучение особенностей взаимодействия с использованием динамической модели СТК и теоретических принципов, отражающих общие и наиболее существенные особенности изучаемого процесса:

Принцип структурно-функционального и динамического единства, обеспечивающий описание особенностей функционирования и развития экстремальной ситуации с учетом многообразия процессов взаимодействия.

Принцип многоуровневости позволяет изучать динамику судна в рамках MMS как структуры, включенную в более сложную систему мониторинга

экстремальных ситуаций, что позволяет исследовать общие закономерности системы и единичные черты объектов взаимодействия.

Принцип причинно-следственных связей позволяет восстанавливать неизвестные причины и конкретные свойства эволюционной динамики в рамках динамической модели СТК.

Функциональная модель программного комплекса. Формальная модель функционирования программного комплекса MMS представляется в виде обобщенной структуры [3]:

$$FM = \{F(S), S(T), B(AR), D(Q, W, V), U(PS)\}, \quad (3)$$

где F(S) – функциональные компоненты комплекса; S(t) – экстремальные ситуации; B(AR) – динамическая база знаний; D(Q, W, V) – обобщенная база данных; U(PC) – управляющие воздействия.

Функциональными компонентами комплекса F(S) являются исполнительные модули прикладных программ MMS, обеспечивающие совместную работу объединяемых систем. Эти модули взаимодействуют с динамической базой знаний B(AR) и обобщенной базой данных D(Q, W, V). Управляющие воздействия U(PC) на основе НФС обеспечивают режим UC [5].

Обобщенная база данных D(Q, W, V) содержит информацию Q об особенностях судна, характеристиках волнения W и ветра V. Структура управления представлена на основе сетевых моделей в соответствии с логикой системы и потоком информации в текущей экстремальной ситуации.

Мультипроцессорная среда, реализующая динамическую модель СТК. Практическая реализация методов СТК в среде MMS связана с выполнением высокопроизводительных вычислений в мультипроцессорной вычислительной среде.

$$FM = \{M\tilde{N}, R(U\tilde{N}), MF, MT\}, \quad (4)$$

где MС – многорежимность, определяющая многообразие условий работы комплекса ФММ; R(UC) – реактивность – способность выполнять сложные вычислительные и логические операции в режиме UC; MF – многопоточный параллелизм на микроуровне; MT – многозадачный параллелизм на макроуровне.

Многопоточный параллелизм динамической модели СТК позволяет использовать преимущества многопроцессорного вычислительного комплекса ФММ на основе синхронизации потоков информации. Многозадачный параллелизм обеспечивает асинхронное выполнение крупных блоков программ, что дает возможность не только ускорить выполнение больших задач за счет распараллеливания, но и разместить в оперативной памяти большой объем данных.

Интеллектуальные технологии обработки информации. Вычислительная среда MMS на основе обработки информации при поддержке комплекса ФММ ориентирована на решение задач контроля в нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуациях:

$$IT = \{AA, DM, P(AR), ER, IM\}, \quad (5)$$

где AA – анализ альтернатив; DM – выявление «скрытых» закономерностей, выделение и анализ нестандартных ситуаций; P(AR) принцип адаптивного резонанса; ER – оценка риска принимаемых решений; IM – иерархическая модель,

объединяющая функциональные модули прикладных программ, описывающая интегрированную систему на различных уровнях абстракции.

Структура программного комплекса обработки информации в среде MMS. Стратегия построения программного комплекса MMS определяет модульную структуру, включающего следующие компоненты:

$$SPC = \{GI(SO), MU(CA), BKD(FE)\}, \quad (6)$$

где GI(SO) – графический интерфейс, предоставляющий доступ к ресурсам управляющего модуля и содержащий графические предметно-ориентированные средства для подготовки и анализа данных, а также для организации выводов и выдачи практических рекомендаций; MU(CA) – управляющий модуль, включающий средства информационного обеспечения вычислительной среды MMS; BKD(FE) – базы знаний и данных, обеспечивающей поддержку разработанной методики анализа и функциональных возможностей среды MMS.

Приведенная характеристика процедур интерпретации эволюционной динамики судна позволяет сформулировать основные требования к модели взаимодействия в среде MMS [1]:

- *содержательная интерпретируемость* с использованием концепции Soft Computing на основе геометрической и аналитической компонент динамической модели СТК;
- *эффективная вычислимость* на основе алгоритмов параллельной обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде.

Эти требования определяют построение модели взаимодействия при разработке алгоритмов контроля экстремальных ситуаций и тестирования базы знаний динамики судна на волнении.

3. Концептуальный базис разработки программного комплекса ФММ в практических приложениях MMS

Повышение эффективности функционирования, достоверности оценки и прогноза экстремальных ситуаций в программном комплексе MMS, использующем интеллектуальные технологии, достигается в рамках парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [1]. Теоретическая база MMS (рис.3) формируется на основе эффективного сочетания накопленной системы знаний с новыми подходами и парадигмами искусственного интеллекта.

Среди них важная роль принадлежит методам и моделям, обеспечивающим формализацию и интеграцию знаний, механизм логического вывода в динамической среде НФС, поиск решений и выдачу практических рекомендаций. Повышение достоверности оценки и прогноза ситуации достигается с использованием теоретических принципов, позволяющих обеспечить рациональную организацию вычислительной технологии обработки данных измерений в задаче анализа и прогноза развития экстремальной ситуации, формализовать поток информации при реализации нечеткого логического вывода в мультипроцессорной вычислительной среде [1].

Анализ открытой системы в рамках СТК позволяет отметить следующие особенности [2]:

- возможность интерпретации элементов среды MMS Comp(IS) во взаимосвязи с окружающей средой;

- более глубокое понимание особенностей среды MMS, причинно-следственных связей между ее элементами, описывающими реальную динамику судна, возможность анализа особенностей функционирования в нестационарной динамической среде:

- Изучение истории изменений среды MMS, неотрывно связанной с внешней средой и накопленной информацией на основе априорных данных модельного и натурального эксперимента.

Таким образом, открытость среды MMS как системы нового поколения, представляет богатые возможности для ее понимания и использования при интерпретации поведения судна в процессе эволюции и формировании аттракторных множеств.

Уменьшение влияния неопределенности при анализе ситуации и разработке управляющих воздействий достигается путем перевода задачи в нечеткий логический базис [3]. Формирование иерархической структуры среды MMS на основе НФС реализовано в такой последовательности:

- каждой экстремальной ситуации ставится в соответствие вектор приоритетов свойств системы и определяется вектор коэффициентов, компоненты которого находятся в зависимости от веса свойства в экстремальной ситуации;

- рассчитываются обобщенные веса свойств системы в зависимости от уровня изменчивости свойства в пределах рассматриваемой задачи на основании энтропийного подхода [2];

- строится иерархическая структура свойств с учетом полученных оценок обобщенных весов.

Помимо рассмотренных принципов формализации информации при построении динамической базы знаний НФС контроля динамики судна используется принцип нормального функционирования. Практическая реализация этого принципа осуществлена на основе развития подхода к формированию моделей живучести и безопасности транспортных систем [2], учитывающего сохранение свойств судна при взаимодействии с внешней средой в предположении инвариантности вектора состояния относительно множества заданных регламентирующих ограничений.

Разработка программного комплекса ФММ в среде MMS основана на следующих особенностях реализации информационных технологий и моделей СТК. Основным элементом информационной модели предметной области MMS является динамическая база знаний, содержащая компоненты, определяющие функционирование программного комплекса в нестационарной среде. Построению ФП ведется на основе базовых множеств $X = \{x_1, \dots, x_n\}$; $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$, на которых заданы входы A_i и выходы B_i НФС. Нечеткое соответствие «вход – выход» строится на основе формализации нечетких стратегий на основе модели, содержащей нечеткие множества A_1, \dots, A_n , определенные на базовом множестве X , и нечеткие множества B_1, \dots, B_n из базового множества Y , заданные с помощью ФП:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)), \quad (7)$$

где $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$ – ФП элементов $x \in X$, $y \in Y$ множеств A и B .

Реализация программного комплекса ФММ в среде MMS позволяет выбирать оптимальные режимы управления и структуру используемых математических моделей. При анализе динамики судна на волнении в нестационарной среде выделяют следующие типы задач:

- интерпретация экстремальной ситуации (прямая задача) – оценка опасности ситуации и прогнозирования ее развития.

- поиск допустимого решения среди сгенерированных альтернатив (обратная задача) в задаче планирования (генерация альтернатив) и целевого управления.

- поиск оптимального решения для различных значений критерия эффективности и целевых ограничений.

4. Интерпретация экстремальных ситуаций в программном комплексе ФММ

Сложность проблемы оценки экстремальных ситуаций в среде MMS, неполнота и неопределенность исходной информации, приводят к необходимости разработки вычислительной технологии ФММ, обеспечивающей обработку данных в режиме УС с помощью высокопроизводительных вычислительных средств. Основная роль в этой технологии принадлежит данным динамических измерений, поступающим от датчиков измерительной системы [1].[2].

Поток данных Work Flow [3] в среде MMS находит применение в задаче построения иерархической структуры мультимодельного комплекса (ММК) ФММ в виде мета-потока на верхнем уровне (интерактивные процедуры), в среде ММК на среднем уровне (формализованный образ ситуации) и на низшем уровне конкретного приложения MMS (внутреннее представление).

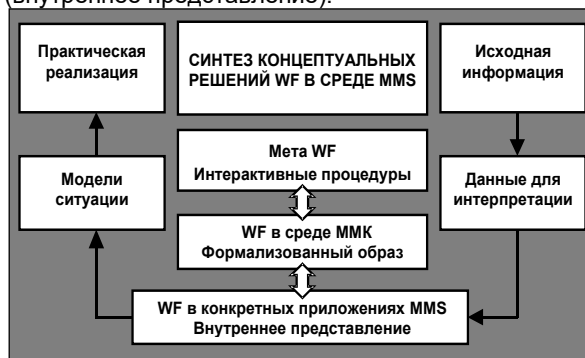


Рис.4. Концепция Work Flow

Процедуры предварительной обработки измерительной информации предусматривают ассимиляцию данных [3], связанную с фильтрацией и контролем данных с целью выделения «полезного сигнала» и отсева недостоверных (ошибочных) данных, а также со «сжатием» информации и идентификацией моделей. Одно из главных условий выполнения этих процедур – обеспечение режима УС на основе парадигмы обработки информации [1]. В результате обеспечивается компромисс между вычислительной эффективностью и универсальностью, что приводит к существенному сокращению времени обработки информации по

сравнению с временем развития контролируемых ситуаций.

Контроль динамики взаимодействия судна с внешней средой, уровней опасности различных нарушений и формирование соответствующих критериев в среде MMS осуществляется на основе методов и моделей, позволяющих формализовать допустимость отклонений от режима нормальной эксплуатации и оценить их безопасность на основе априорной информации и данных моделирования.

Рассмотрим построение НФС контроля динамики судна на волнении, обеспечивающей реализацию механизма интеллектуальной поддержки (ИП) [1]. В зависимости от особенностей взаимодействия, определяемых выделенными режимами движения, используются различные структуры системы. Наиболее простая структура реализована на базе нечеткой модели с коррекцией правил. Система включает в себя блоки предварительной обработки информации (вычислительный блок, блок анализа ситуации и блок сравнения) и блок адаптации на основе матрицы нечетких логических правил и нейросетевых моделей. Процедура адаптации заключается в корректировке выделенной модели из матрицы нечетких логических правил.

Расширенная структура НФС в сложной динамической среде дополняется блоком, содержащим управляющий контроллер, с помощью которого реализуется управление адаптивной системой на основе интеграции компонент, обеспечивающих «подстройку» нейронечеткой системы логических правил с использованием нейросетевого ансамбля и базы знаний прецедентов [2]. В особо сложных ситуациях, когда НФС испытывает затруднения в выполнении процедуры контроля, осуществляется логический вывод по прецеденту с соответствующим представлением динамической картины взаимодействия.

Преимущества реализации методов и моделей ФММ в среде MMS наибольшей степени проявляются в организации интерфейса оператора:

- предоставление наиболее полной и сжатой информации, характеризующей текущую экстремальную ситуацию;
- геометрические образы, отображающие среду взаимодействия, достаточно просты и легко воспринимаются оператором при интерпретации экстремальных ситуаций в условиях дефицита времени;
- возможности интеграции геометрической и аналитической информации, на основе которой реализуется принципиально новая организация человека – компьютерного взаимодействия в экстремальных ситуациях.

При реализации интерфейса предусмотрены следующие варианты решения [1],[2]: анализ и прогноз ситуации; визуализация динамики взаимодействия; оперативное управление. Таким образом, модель ИП оператора сочетает преимущества графической и аналитической интерпретации экстремальных ситуаций.

Модель SMM реализует общие принципы обработки информации в рамках динамической модели СТК [1]. Интеграция достижений современной компьютерной математики с интеллектуальными технологиями и

высокопроизводительными вычислениями представлена на рис.5. Здесь выделены основные направления интерпретации SMM в рамках концепции UC [5].

Процесс управления SMM как АДС [4] состоит в установлении гармонии и гомеостаза на информационном уровне в виде непрерывного потока информации динамической среды ФММ [2]:

$$\langle T, S, U, W, X, Y \rangle, \quad (8)$$

где T – дискретные моменты времени на интервале реализации $[t_0, t_k]$; S – состояния объектов среды; U и W – управляющие и возмущающие воздействия; X и Y – входы и выходы системы.

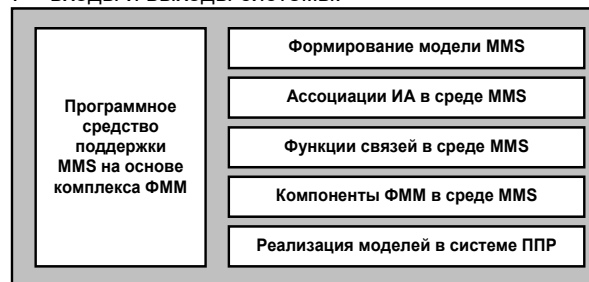


Рис.5. Парадигма высокопроизводительных вычислений при интерпретации SMM

Контроль динамики SMM осуществляется с использованием следующих аксиом [3].

Аксиома 2. Идентификация ситуации осуществляется из множества альтернативных структур $\{S_j\}$, $j = 1, \dots, z$, каждой из которых по выбранному критерию R соответствует один из альтернативных алгоритмов SMM $\{A_i\}$, $i = 1, \dots, q$.

Аксиома 3. Соответствие между исследуемой ситуацией S_i и оптимальной структурой алгоритма SMM $S_i \rightarrow A_i$, реализуется функцией $i = \varphi(j)$, $i = 1, \dots, q$, $j = 1, \dots, z$, с помощью которой решается проблема адаптируемой структуры SMM.

Аксиома 4. Каждую ситуацию в SMM кодируют вектором $S = (S_1, \dots, S_u)$ в u-мерном пространстве. Точке S_i этого пространства соответствует лучший алгоритм A_i , определяемый как

$$R(A_i, S_i) = \min_{j=1, \dots, q} R(A_j, S_i). \quad (9)$$

Таким образом, интерпретация поведения среды SMM состоит в решении q-классовой задачи распознавания образов на основе конечной обучающей выборки $\langle S_j, A_j \rangle$ ($j = 1, \dots, N$), элементы которой определяются путем решения оптимизационной задачи

$$R(A, S_i) \rightarrow \min_{A_1, \dots, A_q} \Rightarrow A_j, \quad (10)$$

где S_j ($j = 1, \dots, N$) – ситуации, представляющие различные части пространства $\{S\}$.

Усложняя систему и организуя ее адаптивные свойства, можно управлять процессами поддержания ее устойчивости. Согласно закону Окаама [2], если получается несколько корректных решений, то лучшее из них – решение, обладающее наименьшей структурной сложностью. Другой важный показатель системы – вычислительная сложность обработки информации в режиме UC.

Таким образом, разработанные концептуальные решения MMS и комплекс ФММ обеспечивают построение и использование моделей

взаимодействия в рамках теоретических принципов и механизмов обработки информации в условиях нестационарных воздействий внешней среды. Механизм этого феномена реализуется на основе эволюционной парадигмы формирования потенциальных свойств интерпретирующих и управляющих моделей на основе ND-системы.

Литература

1. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011.– 392 с.
2. Нечаев Ю.И. Интеллектуальные технологии в системе исследовательского проектирования. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. – 320 с.
3. Нечаев Ю.И. Проблемы мультиагентного моделирования на основе нейродинамических систем и современной теории катастроф // XX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2018». Лекции по нейроинформатике. М.: НИЯУ МИФИ. 2018, с.157 – 199.
4. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. – М.: СИНЕГ, 1999. – 104 с.
5. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>>.

References

1. *Nechaev Yu. I.* Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2011.
2. *Nechaev Yu. I.* Intel'ktual'nye tekhnologii v sisteme issledovatel'skogo proektirovaniya [Intellectual technologies in research design system]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2017.
3. *Nechaev Yu. I.* Problemy multi-agentnogo modelirovaniya na osnove neyrodinamicheskikh system I sovremennoi teorii katastrof [Problems of the multi-agent modeling on the base neurodynamic systems and modern of catastrophe theory] // XX International conference «Neuroinformatika». Lekzii po neuroinformatike. M: NIJAU. MIFI, 2018, p.157 – 199.
4. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs teorii aktivnykh sistem [Course of the theory of active systems]. - M: SINEG, 1999. - 104 p.
5. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Иванович Нечаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Yuri I. Nechaev, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.050
 УДК 004.942:004.031.043

Функционирование бортовой интеллектуальной системы на основе комплекса управляемого дистанционного эксперимента

Ю.И. Нечаев¹, О.Н. Петров¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассматривается повышение эффективности функционирования бортовой интеллектуальной системы (ИС) при использовании комплекса управляемого дистанционного эксперимента (УДЭ). Такая технология интеллектуальной поддержки обеспечивают анализ и прогноз развития экстремальных ситуаций на основе данных физического моделирования и динамической модели современной теории катастроф (СТК), интегрирующей интеллектуальных технологии и высокопроизводительные вычисления. Особенности построения комплекса УДЭ связаны с развитием новых подходов к интеграции знаний сложных систем в эволюционирующей нестационарной среде. Программный комплекс УДЭ представляет собой активную динамическую систему (АДС), обеспечивающую оперативный контроль динамики судна на основе взаимодействия динамической базы знаний бортовой ИС и комплекса УДЭ в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [1] – [8]. Динамика взаимодействия имитируется с помощью системы управления, реализующей физические эффекты в процессе развития аварийной ситуации. Приведены примеры реализации разработанной стратегии при контроле экстремальных ситуаций в бортовых ИС новых поколений. **Ключевые слова:** управляемый дистанционный эксперимент, моделирование экстремальных ситуаций, мультиагентная система, режим экстренных вычислений.

Functioning of the onboard intellectual system based on the complex of a controlled remote experiment

Yuri I. Nechaev¹, Oleg N. Petrov¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. An increase in the functioning efficiency of an onboard intellectual system (IS) when using a complex of controlled remote experiment (CRE) is considered. Such intellectual support technology provides analysis and forecast of the development of extreme situations on the basis of physical modeling data and a dynamic model of modern catastrophe theory (MCT), integrating intellectual technologies and high-performance computing. The features of constructing the CRE complex are associated with the development of new approaches to the integration of knowledge of complex systems in an evolving non-stationary environment. The CRE software package is an active dynamic system (ADS) that provides operational control of the vessel's dynamics based on the interaction of the onboard intellectual system dynamic knowledge base and the CRE complex in urgent computing mode (Urgent Computing - UC) [1] - [8]. The dynamics of interaction is simulated using a control system that implements physical effects in the process of emergency situation evolution. Examples of the implementation of the developed strategy for the control of extreme situations in the onboard intellectual systems of new generations are given.

Key words: controlled remote experiment, extreme situations modeling, multi-agent system, urgent computing.

Введение

Контроль эволюции аварийного судна в сложных условиях взаимодействия, особенно в нестационарной динамической среде, осуществляется на основе концептуальных решений динамической модели современной теории катастроф (СТК) (рис. 1), характеризующей фундаментальный результат интеграции достижений в области интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений [3] – [5].

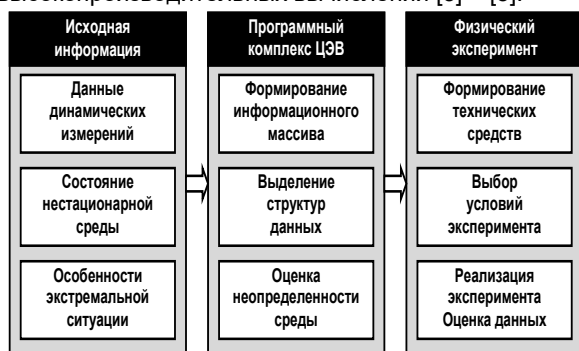


Рис. 1. Интегрированный комплекс ППР при контроле экстремальных ситуаций

Стратегия СТК реализуется на основе программного комплекса центра экстренных вычислений (ЦЭВ), управляющий модуль которого соединяет достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) с современным математическим аппаратом физического моделирования на основе управляемого дистанционного эксперимента (УДЭ) [1] и средствами экстренных вычислений [8].

Теоретический фундамент этой интеграции служит мощным средством обработки и формализации информации. Он не заменяет методы классической математики и традиционных систем физического моделирования, а дополняет их новыми подходами и моделями, способствуя получению новых знаний о динамике нестационарных систем. При этом реализуется цепочка преобразования информации, связывающая анализ чрезвычайных ситуаций с синтезом системы на основе формальных моделей СТК и интеллектуальных технологий.

$$H^0[N(\rho)] = N(\rho^*), H^1(N(\rho)) \rightarrow DM(N, \rho), \quad (1)$$

где $H^0\{N(\rho)\}$ – ядро гомеоморфизма $N(\rho)$, позволяющее реализовать преобразование информации в виде соотношения ядра $N(\rho)$ к образу текущей ситуации $N(\rho^*)$, обеспечивающие

формальный аппарат системы поддержки принятия решений (ППР) в среде ЦЭВ.

Концептуальные решения при функционировании комплекса ЦЭВ – инструмент ППР, реализуемый как АДС [6] в рамках интеллектуальных технологий XXI века. Это открывает пути изучения не только качественных, но и количественных интерпретаций процессов и явлений динамики аварийного судна, в том числе и в экстремальных ситуациях. Исследование резких изменений в поведении аварийного судна, как сложной динамической системы, не всегда доступно на основе традиционных методов физического моделирования, а натурный эксперимент опасен и часто невозможен.

Методы и модели в системе ППР интегрированного комплекса ЦЭВ позволяют анализировать резкие скачкообразные изменения состояний эволюционирующих систем, переходящих от одного равновесного состояния к другому, весьма далекому от первоначального. В отличие от традиционных методов исследования нелинейных систем, динамическая модель СТК базируется на специальном математическом аппарате, позволяющим описать сложные физические явления с помощью ограниченного числа локальных геометрических структур для устойчивых множеств катастроф.

Таким образом, цель настоящего исследования – построение и анализ моделей взаимодействия судна с внешней средой на базе ЦЭВ, функционирующего на основе динамической модели СТК с использованием интеллектуальных технологий в режиме УС.

1. Интеллектуальный комплекс УДЭ в среде УС

Виртуальный инструмент ЦЭВ представляет собой программно-аппаратный комплекс (рис. 2), обеспечивающий интерактивное взаимодействие оператора с компьютерной системой УДЭ [1], [5]. Графический интерфейс выполняет роль управления и реализуется на основе имитационной модели в виде графических объектов на экране монитора.

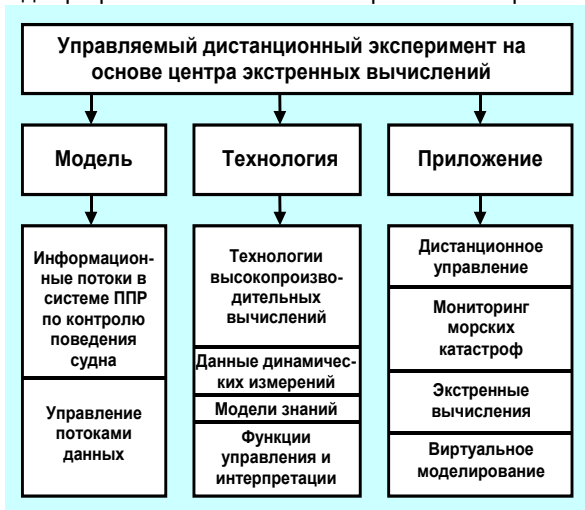


Рис. 2. Управляемый дистанционный эксперимент при контроле экстремальных ситуаций

Развитие концепции управляемого дистанционного эксперимента (УДЭ) [1] в ЦЭВ связано с технологией распределенной

информационной среды, обеспечивающей возможность удаленного доступа к источникам информации в виде гидродинамической лаборатории физического моделирования КГТУ [5], береговых научно-исследовательских центров и др.

Последовательность событий, определяемая цепочкой преобразования информации при взаимодействии ЦЭВ с бортовой ИС и комплексом УДЭ, имеет вид:

$$P(t) \rightarrow G(D, F) \rightarrow S(U, R), \quad (2)$$

где $P(t)$ – исходная задача, поступающая от бортовой ИС аварийного судна; $G(D, F)$ – граф, определяющий генерируемые решения и функции интерпретации в среде УДЭ; $S(U, R)$ – реализация управления с заданным ядром гомеоморфизма, обеспечивающего функции анализа и прогноза развития аварийной ситуации и оценку риска принимаемых решений в условиях неопределенности.

Представим модель обработки потока информации при формировании элементов $M(S)$, определяющих информационную базу нестационарной динамики аварийного судна методами СТК в среде ЦЭВ:

$$M(S) = \langle F_1(X, U), F_2(Y, Z), F_3(X, Q), F_4(S) \rangle, \quad (3)$$

где $F_1(X, U)$ – функция, определяющая структуру алгоритмов предварительной обработки информации X ; U – возмущающее воздействие нестационарной ветроволновой среды; $F_2(Y, Z)$ – функция, определяющая состав алгоритмов, обеспечивающих формирование из выходной информации Y элементов Z , определяющих состояние аварийного судна в контролируемой ситуации; $F_3(X, Q)$ – функции, определяющие состав алгоритмов и программного обеспечения, реализующих вычисление информационных признаков с использованием полезной информации, нормативных значений и критериальных уравнений; $F_4(S)$ – функция интерпретации, обеспечивающая идентификацию текущей ситуации S с помощью нечеткой формальной системы (НФС).

Важной особенностью ЦЭВ, реализующего концепцию УДЭ, является возможность получения первичной информации и организация ее практического использования в системе УДЭ (рис. 3).

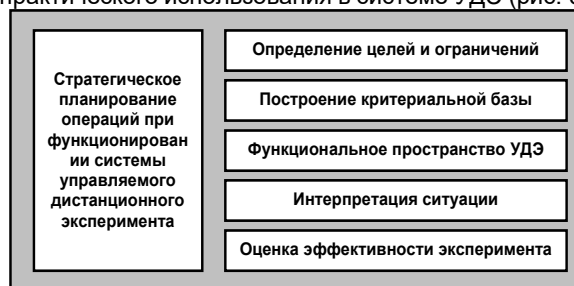


Рис. 3. Структурная схема управляемого дистанционного эксперимента.

Программно-аппаратный комплекс ЦЭВ на основе УДЭ ориентирован на решение широкого спектра задач сбора, обработки, передачи и представления информации в условиях удаленного доступа к ее источникам. Управление распределенными элементами комплекса осуществляется управляющим сервером через

среду вычислительных сетей Internet. При этом важное значение имеет *модель эксперимента*, которая рассматривается как сложный информационный процесс, представленный иерархией взаимосвязанных компонент сбора, обработки, передачи и представления информации, разнесенных во времени и пространстве.

Моделирование процесса взаимодействия судна в нестационарной среде на основе УДЭ осуществляется при следующих условиях:

- формируется критериальный базис модельных испытаний на основе теории физического эксперимента, строится план эксперимента и стратегии интерпретации результатов;

- строится функция интерпретации $L_E(X)$ допустимых значений информационного вектора X параметров эксперимента при ограничениях на время его реализации $T_E(X)$ при условии [5]:

$$L_E(X) \rightarrow \max; \quad T_E(X) \leq T_0, \quad (4)$$

где T_0 – допустимое время эксперимента с учетом динамики развития аварии;

- минимизация функции времени контроля ситуации $T_E(X)$ на множестве допустимых значений векторов $L_E(X)$ осуществляется при ограничении на $L_E(X)$:

$$T_E(X) \rightarrow \min; \quad L_E(X) \geq L_{E0}. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) определяют модель эксперимента и процедуры интерпретации, позволяющие прогнозировать результаты и оптимизировать алгоритм контроля с помощью средств интеллектуальной поддержки (ИП) физического эксперимента. При этом рассматривается модель $F \rightarrow S$ (факторы – ситуация), определяющая условия возникновения аварийной ситуации и модель $S \rightarrow F$ (ситуация – факторы), определяющая причины возникновения ситуации. Другие процедуры ИП обеспечивают проведение физического моделирования аварийной ситуации, представление результатов и визуализацию физических особенностей и динамической картины текущей ситуации в виде сжатого «когнитивного образа» ситуации.

2. Эволюционная динамика при функционировании системы УДЭ

На рис. 4 представлены эволюционная динамика развития экстремальных ситуаций при моделировании аварийных ситуаций в системе УДЭ. Здесь выделены наиболее сложные ситуации, физическое моделирование которых обеспечивается с помощью волнопродуктора, генерирующего нестационарное волновое поле по данным измерений, представленных бортовой ИС. Динамика взаимодействия имитируется с помощью системы управления, реализующей физические эффекты в процессе развития аварийной ситуации: анализ и прогноз развития динамики в процессах эволюции и самоорганизации, особенно при возникновении «потенциальной ямы» при реализации физического эксперимента в комплексе УДЭ.

Таким образом, концептуальные решения и результаты физического эксперимента в системе УДЭ обеспечивают построение и использование моделей взаимодействия в рамках теоретических принципов и механизмов обработки информации в условиях нестационарных воздействий внешней

среды. Механизм этого феномена реализуется на основе эволюционной парадигмы формирования потенциальных свойств интерпретирующих и управляющих моделей на основе системы программного управления дистанционным экспериментом.

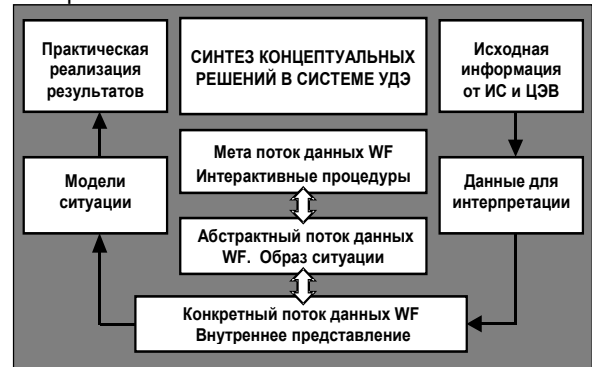


Рис. 4. Динамические модели интерпретации чрезвычайных ситуаций

Формальная модель преобразования информации в системе УДЭ определяет последовательность операций выполнения процедур в рамках приведенного потока данных в следующем виде:

$$M(WF) \rightarrow A(WF) \rightarrow C(WF) \Rightarrow R(FE), \quad (6)$$

где $M(WF)$ и $A(WF)$ — пространство поведения СТК, обеспечивающее интерактивные процедуры формирования исходных данных для создания абстрактного образа аварийной ситуации на основе базы знаний прецедентов; $C(WF)$ – пространство поведения СТК, реализующее конкретный образ аварийной ситуации; $R(FE)$ – пространство управления, определяющие результат преобразования информации, на основании которого осуществляется реконструкция исходной модели физического эксперимента, выполнение процедур его проведения, анализ и представление результата с интерпретации физической картины взаимодействия.

Оптимальный план действий в системе УДЭ, обеспечивающий наилучшую стратегию реализации физического эксперимента, определяет поиск экстремума функции интерпретации F на основе минимаксного плана как наиболее эффективного в заданной ситуации взаимодействия объектов в нестационарной среде:

$$P(Opt) = \min \max F(P_0), \quad (7)$$

где P_0 и P – исходный и генерируемый планы.

3. Стратегия и тактика физического эксперимента в комплексе УДЭ

Исходные данные о текущей ситуации при реализации физического эксперимента получают путем обработки априорной информации и данных измерений (рис. 5). Обработка реализуется в режиме УС и позволяет «настроить» систему физического моделирования на решение задач интерпретации аварийной ситуации. Алгоритмы анализа и прогноза эволюционной динамики позволяют в процессе физического эксперимента воссоздавать текущие характеристики внешних возмущений и параметры взаимодействия, а также формализовать логику функционирования динамической базы знаний НФС,

поддерживающей процедуры моделирования на основе информации о состоянии аварийного судна и внешней среды.

Информационное пространство, предоставляемое системой ИП, обеспечивает возможность взаимодействия оператора ЦЭВ при решении задач анализа и интерпретации информации на всех стадиях физического эксперимента. Общая информационная модель ИП представляется как информационных объектов, определяющих стратегию и тактику эксперимента. Адаптивная система ЦЭВ обеспечивает функционирование процесса моделирования и интерпретации полученных решений на базе информационной модели.

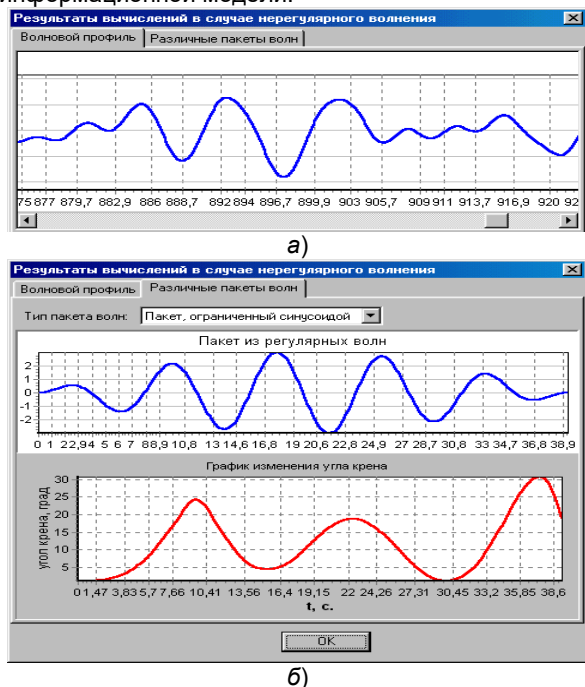


Рис. 5. Поток информации в системе УДЭ: а – фрагменты генерируемого волнения; б – динамика крена под воздействием пакета волн

Прогнозирование информационных потребностей в системе ИП процесса физического моделирования заключается в определении класса решаемой задачи (динамического образа ситуации), формировании и преобразовании информации по управлению процессом моделирования с учетом особенностей эволюционной динамики аварийной ситуации. При разработке модели ИП производится предварительная оценка эффективности ее использования в сложных задачах интерпретации динамических ситуаций.

Концепция интегрированной системы ИП обеспечения стратегии и тактики вычислительно эксперимента формулируется как обобщение и развитие традиционных моделей обработки информации, использующих эффективные методы планирования и высокопроизводительные средства вычислений [5], [8]. Концептуальная модель предусматривает использование интегрированной системы ИП не только для решения сложных задач физического моделирования и интерпретации результатов, но и для обеспечения

функционирования вычислительного комплекса УДЭ, связанного с программной системой УС.

При разработке концептуальной модели формулируются принципы построения и особенности применения интегрированных систем ИП при решении сложных задач моделирования и интерпретации информации. Среди этих принципов следует выделить адаптивность, многопроцессорность и максимальное быстродействие, открытость и непрерывность функционирования. Интегрированная система ИП обладает возможностью эволюционного наращивания вычислительной системы в условиях непрерывного изменения динамики объектов взаимодействия и внешней среды.

В результате эксперимента в принятой области планирования W , определяется вектор Y результатов наблюдений. Матрица F выделенных факторов и их комбинаций и вектор Y полностью описывают информацию, необходимую для определения вектора A неизвестных коэффициентов a_0, \dots, a_k исходной модели исследуемой ситуации.

$$F = \begin{bmatrix} f_0(x^1) & f_1(x^1) & \dots & f_k(x^1) \\ f_0(x^2) & f_1(x^2) & \dots & f_k(x^2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_0(x^n) & f_1(x^n) & \dots & f_k(x^n) \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Достоверность оценок этих коэффициентов можно существенно повысить не только за счет выбора метода обработки результатов, но и рациональным размещением координат точек, в которых осуществляются измерения.

Выбор числа и условий эксперимента, обеспечивающих получение наилучшего результата исследования, составляет цель планирования физического эксперимента. Построение оптимального плана зависит от конкретных особенностей эволюционной динамики аварийного судна. Критерии оптимальности планов эксперимента основаны на допущении, что систематическая ошибка относительно модели отсутствует и учитываются только случайные ошибки.

4. Интерпретация экстремальных ситуаций в комплексе УДЭ

Общее направление стратегии интерпретации результатов физического моделирования в системе УДЭ определяется в соответствии с высказыванием И.Ньютона: «...объяснить как можно большее количество фактов как можно меньшим числом исходных положений». Отсюда следует, что по мере развития теоретических принципов ППР число объясняемых фактов должно возрасти, а число исходных положений (постулатов, принципов) – сокращаться. Как показывает результаты исследований [3], [4], построение теории прикладного моделирования в виде замкнутой системы знаний требует ресурсоемких вычислений на базе исходных положений и концептуальных решений.

Модель интерпретации функционального пространства эволюционной динамики аварийного судна, имеет вид:

$$S(U) = \left\langle \left\{ T(t, \tau) \times X(KB) \times Q(V, W) \right\} \rightarrow Y(R) \right\rangle, \quad (9)$$

где $S(U)$ определяет стратегии управления физическим экспериментом, а ее компоненты представляют следующие структуры: $F(Com)$ – элементы UC, реализующие принцип конкуренции; $T(t, \tau)$ – моменты времени, определяющие модель развития аварийной ситуации; $X(KB)$ – элементы оперативной базы данных; $Q(V, W)$ – значения вектора входных воздействий внешней среды; $\{T(t, \tau) \times X(KB) \times Q(V, W)\}$ – множество закономерностей в данных; $Y(R)$ – множество правил обобщения информации; τ – интервал реализации.

Функциональное пространство (9) определяет эволюцию процессов взаимодействия при физическом моделировании аварийных ситуаций в нестационарной динамической среде (рис. 6).

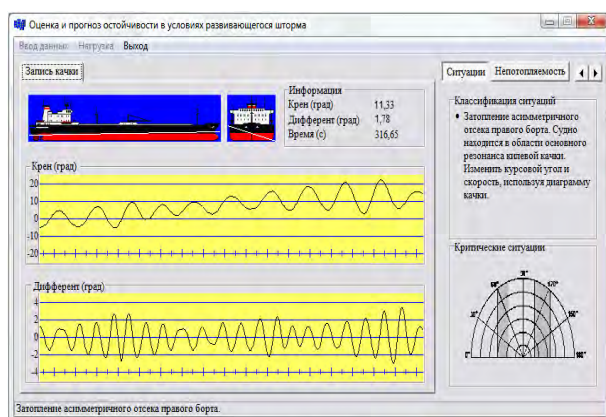


Рис. 6. Результаты моделирования и практические рекомендации

Два пересекающиеся множества A и B характеризуют конкурирующие алгоритмы с помощью функции интерпретации $f: X \rightarrow Y$, представленной в виде:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \in A, x \in B; \\ 0, & x \in A, x \notin B, \end{cases} \quad (10)$$

где значение 1 соответствует структуре алгоритма x , соответствующей требованиям минимальной длины описания (Minimal Description Length – MDL) [2] ($A \in X$) и принципу сложности ($B \in Y$) [7], а 0 – удовлетворяющей требованиям MDL, но не соответствующей принципу сложности; X и Y – множества, содержащие рассматриваемые алгоритмы.

Среди исходных положений теоретического базиса интерпретации поведения можно выделить «динамическое ядро», задающее тенденции движения функциональных элементов программного комплекса системы ППР, и набор условий, в которых они действуют. Этот набор может изменяться и расширяться в зависимости от особенностей системы взаимодействия. Ядро же разрабатываемой теории может быть сведено к ограниченному числу

принципов, центральным из которых является принцип оптимальности, а скрытые механизмы его достижения многочисленны и сложны при интерпретации динамики аварийного судна.

Модель взаимодействия ψ_a представляется в следующем виде:

$$\psi_a = \langle x, y, z, f, g \rangle, \quad (11)$$

где $x=x(t)$ – входные данные в виде конечного множества функций времени:

$$\langle x_0(t), \dots, x_k(t) \rangle, \quad (12)$$

$y=y(t)$ – выходные данные, представляющие собой конечное множество функционального состояния аварийной ситуации

$$\langle y_1(t), \dots, y_m(t) \rangle, \quad (13)$$

$z=z(t)$ – переменная состояния модели, характеризующая конечное множество функций

$$\langle z_1(t), \dots, z_n(t) \rangle, \quad (14)$$

значения которых в заданный момент времени позволяют определять выходные характеристики модели ψ_a ; f и g – функционалы (уравнения системы), задающие текущие значения выходного сигнала $y(t)$ и состояния аварийного судна $z(t)$:

$$y_1(t) = g(z(t), x(t)), \quad (15)$$

$$z(t) = f(z(t_0), x(\tau), \tau \in [t_0, t]), \quad (16)$$

Соотношения (15) и (16) определяют уравнения наблюдаемости и состояния.

Заключение

Таким образом, актуальность создания системы УДЭ и интеллектуального ядра программного комплекса ЦЭВ определяется развитием теоретических и концептуальных решений в системах принятия управленческих решений по контролю аварийных ситуаций морских судов на базе интеллектуальных технологий и программных средств UC.

Основанием для создания структуры ЦЭВ является рост вычислительных ресурсов, а основным направлением эволюции компьютерных технологий – их интеллектуализация. Выработка стратегических решений при функционировании ЦЭВ позволяет формализовать сложные задачи моделирования и интерпретации динамики взаимодействия в сложных динамических средах. Общенаучная основа решения прикладных задач определяют «концептуальный мост» между фактами и механизмами взаимодействия при комплексном изучении чрезвычайных ситуаций, переходом от содержательной постановки задач к их математической и научно-технической реализации [3], [4].

Научный задел по использованию системы УДЭ открывает перспективы создания научных основ центра управления движением транспортных потоков беспилотных судов в нестационарной динамической среде.

Литература

1. Андреев С.В., Шкодырев В.П. Интеллектуальный WEB-сервер управления дистанционным экспериментом // Труды международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2001. Санкт-Петербург. 2001. Т.1, с. 274-277.
2. Колмогоров А.Н. Избранные труды в 6-ти томах. М.: Наука, 2005. 304 с.

3. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
4. Нечаев Ю.И. Интеллектуальные технологии в системе исследовательского проектирования. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. 320 с.
5. Нечаев Ю.И. Проблемы мультиагентного моделирования на основе нейродинамических систем и современной теории катастроф // XX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2018». Лекции по нейроинформатике. М.: НИЯУ МИФИ. 2018, с.157 – 199.
6. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНЕГ, 1999. 104 с.
7. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. М.: Наука, 1990. 341 с.
8. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

References

1. Andreev S.V., Shkodyrev V.P. Intellektual'nyy WEB-server upravleniya distantsionnym eksperimentom [Intellectual WEB-server for remote experiment control]. Works of international conference on soft computing and measurement (SCM 2001). Saint-Petersburg, LETI Publ., 2001, V. 1, p.p. 274-277.
2. Kolmogorov A.N. Isbrannye trudy v 6 tomakh [The selected works in 6 volumes]. M., Science Publ., 2005. 304 p.
3. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2011.
4. Nechaev Yu.I. Intellektual'nye tekhnologii v sisteme issledovatel'skogo proektirovaniya [Intellectual technologies in research design system]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2017.
5. Nechaev Yu.I. Problemy multi-agentnogo modelirovaniya na osnove neyrodinamicheskikh system i sovremennoi teorii katastrof [Problems of the multi-agent modeling on the base neurodynamic systems and modern of catastrophe theory]. XX International conference «Neuroinformatic». Lekzii po neiroidnformatike. M. MIFI Publ., 2018, p.p. 157-199.
6. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs teorii aktivnykh sistem [Course of the theory of active systems]. M: SINEG Publ., 1999. 104 p.
7. Solodovnikov V.V., Tumarkin V. I. Teoriya slozhnosti i proektirovanie upravlyauschich system [The theory of complexity and designing of control systems]. M: Science Publ., 1990. 341 p.
8. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Иванович Нечаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Yuri I. Nechaev, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Олег Николаевич Петров, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: petr_oleg@mail.ru

Oleg N. Petrov, Ph. D. (Eng), associate professor, associate professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: petr_oleg@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.051

УДК 004.942:004.031.043

Интеллектуальная технология контроля динамической непотопляемости беспилотного судна

Ю.И. Нечаев¹, О.Н. Петров¹¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. Рассматривается интеллектуальная технология управления процессом контроля динамической непотопляемости с использованием центра дистанционного управления (ЦДУ). Технология обеспечивает анализ и прогноз развития экстремальной ситуации, связанной с затоплением отсеков беспилотного судна, находящегося в условиях нестационарного воздействия ветроволновых возмущений. Оперативный контроль динамики аварийного судна в заданных условиях эксплуатации производится при поддержке модуля ЦДУ – многофункционального программного комплекса (МПК) моделирования нестационарной динамики аварийного судна на основе динамической модели современной теории катастроф (СТК), интегрирующей интеллектуальных технологии и высокопроизводительные вычисления. Особенности функционирования ЦДУ при контроле нестационарной динамики аварийного судна беспилотного управления связаны с развитием новых подходов к интеграции знаний сложных динамических систем в эволюционирующей среде. Программный комплекс ЦДУ представляет собой активную динамическую систему (АДС), обеспечивающую оперативный контроль поведения транспортного потока в экстремальных ситуациях в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [1] – [9]. Стратегические решения оперативного контроля аварийной ситуации беспилотного судна рассмотрены применительно к модельной ситуации в условиях катастрофического затопления.

Ключевые слова: беспилотное судно, аварийная ситуация, центр дистанционного управления, современная теория катастроф, режим экстренных вычислений.

Intellectual technology for control of dynamic unsinkability on the unmanned vessels

Yuri I. Nechaev¹, Oleg N. Petrov¹¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. Intellectual technology for controlling dynamic unsinkability control using a remote control center (RCC) is considered. The technology provides an analysis and prediction of the development of an extreme situation associated with the flooding of the compartments of an unmanned vessel, which is under the non-stationary influence of wind and wave disturbances. Operational monitoring of the dynamics of an emergency vessel under specified operating conditions is carried out with the support of the RCC module - a multifunctional software package (MSP) for modeling the unsteady dynamics of an emergency vessel based on the dynamic model of modern catastrophe theory (MCT), integrating intellectual technologies and high-performance computing. Peculiarities of the functioning of the RCC during the control of the non-stationary dynamics of an emergency unmanned vessel are associated with the development of new approaches to the integration of knowledge of complex dynamic systems in an evolving environment. The software complex is an active dynamic system (ADS), providing operational control of the behavior of the traffic flow in extreme situations in urgent computing mode (UC) [1] - [9]. Strategic decisions for the operational control of the emergency situation of an unmanned vessel are considered in relation to the model situation in the conditions of catastrophic flooding.

Key words: controlled remote experiment, extreme situations modeling, multi-agent system, urgent computing.

Введение

Одно из новых направлений контроля динамической непотопляемости в нестационарной среде – реализация интеллектуальной технологии интерпретации поведения беспилотного судна в условиях интенсивного затопления отсеков.

Реализация этой технологии осуществляется на основе ЦДУ с использованием стратегии пространственно-временного континуума. Функционирование ЦДУ при различном уровне действующих возмущений обеспечивается в рамках многорежимной системы. Управленческие решения при контроле динамики беспилотного судна в аварийной ситуации формируются при интерактивном взаимодействии оператора с основным модулем ЦДУ – многофункциональным программным комплексом (МПК). Графический интерфейс поддерживает функции контроля

беспилотного судна в аварийной ситуации на основе имитационной модели в виде графических объектов на экране монитора. Развитие концепции ЦДУ при контроле аварийной ситуации связано с технологией распределенной информационной среды, обеспечивающей возможность удаленного доступа к источникам информации о динамике беспилотного судна с использованием МПК, содержащего виртуальный центр моделирования и визуализации динамических сцен.

1. Программно-управляющий комплекс контроля аварийной ситуации

Функциональные возможности МПК реализуются на основе концепции управляемого дистанционного эксперимента [5], в рамках которого формируется необходимая информации и организация ее передачи между отдельными подсистемами ЦДУ и

потребителем (беспилотным аварийным судном в заданном районе эксплуатации). Практическая реализация программной среды ЦДУ представлена на рис. 1.

Программно-аппаратный комплекс ЦДУ обеспечивает моделирование эволюционной динамики беспилотного судна в виде широкого спектра задач интерпретации аварийной ситуации в условиях удаленного доступа к ее источнику. Процесс моделирования поддерживается управляющим сервером через среду вычислительных сетей Internet. Стратегия контроля реализуется моделью управления, которая рассматривается как сложный информационный процесс, представленный иерархией взаимосвязанных компонент сбора, обработки, передачи и представления информации, разнесенных во времени и пространстве. *Дерево функций* интерпретации поведения аварийного судна в ЦДУ представляет декомпозицию функций контроля с целью исследования функциональных компонентов динамической модели СТК на различных уровнях иерархии. На базе дерева функций осуществляется формирование последовательности выполнения этапов интерпретирующей системы и строится модель контроля аварийной ситуации с использованием функциональных модулей ЦДУ. Принцип multifunctionality обеспечивает эффективное управление эволюционной динамикой беспилотного судна в экстремальной ситуации и разрешение противоречий функционально-структурной организации ЦДУ.



Рис. 1. Структурная схема ЦДУ

Эволюция аварийного судна развивается в соответствии с особенностями взаимодействия в нестационарной динамической среде и формализуется на основе следующей теоремы.

Теорема 1. Эволюционная динамика аварийного беспилотного судна на интервале реализации $[t_0, t_k]$ интерпретируется в рамках динамической модели СТК, позволяющей выделять в процессе развития аварийной ситуации критические моменты времени возникновения неблагоприятных режимов взаимодействия с нестационарной средой и вырабатывать управляющие воздействия по предотвращению чрезвычайной ситуации.

Доказательство этой теоремы применительно к контролю экстремальных ситуаций можно найти в работах при рассмотрении приложения динамической модели СТК [3] в задачах динамической непотопляемости [4].

2. Обработка информации при контроле аварийной ситуации

Концептуальная модель обработки информации при интерпретации аварийной ситуации беспилотного судна в функциональных пространствах СТК имеет вид:

$$U(Str) = \{\tau(t), Q(W)\} \rightarrow Y(R), \quad (1)$$

где $U(Str)$ определяет множество стратегий контроля эволюционной динамики аварийного судна, а ее компоненты представляют следующие структуры: $\tau(t)$ – моменты времени, определяющие развитие аварийной ситуации; $Q(W)$ – значения вектора входных воздействий (состояние нестационарной внешней среды и аварийного судна); $\{T(t) \times Q(W)\}$ – множество закономерностей в данных; $Y(R)$ – управленческие решения, генерируемые системой обобщения информации при управлении аварийной динамикой.

Инфраструктура ЦДУ, управляющая процессом контроля аварийной ситуации, основана на реализации интеллектуальных технологий (ИТ) в текущих динамических ситуациях. Процедуры ИТ обеспечивают решение взаимосвязанных задач контроля динамики аварийного судна в режиме УС при оперативной обработке текущей информации в высокопроизводительной вычислительной среде. Интегрированный информационно-управляющий комплекс дистанционного управления аварийной динамикой беспилотного судна организован как сложная многоуровневая система интеллектуальной поддержки (ИП) управленческих решений:

$$\langle S(Int), N(R), IP(MS), IT(Kn) \rangle, \quad (2)$$

где функциональные блоки системы: $S(Int)$ – диалоговая система, обеспечивающая анализ состояния динамики аварийного судна, выработку управляющих воздействий на основе проблемно-ориентированной динамической базы знаний нечеткой формальной системы (НФС); $M(Risk)$ – моделирование и оценка риска генерируемых решений с использованием системы динамической визуализации; $IP(MS)$ – выполнение сценариев развития аварийной ситуации; $IT(Kn)$ – интеллектуальные технологии и структуры моделирования.

Декомпозиция функций системы контроля аварийной динамики беспилотного судна реализуется с помощью дерева функций на различных уровнях иерархии (рис. 2).

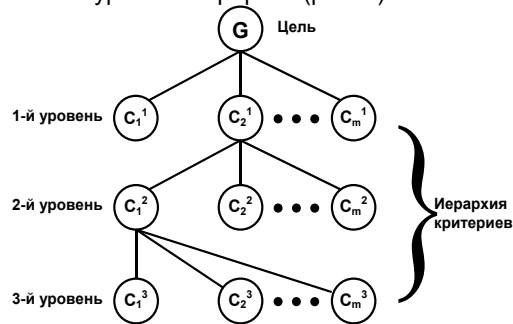


Рис. 2. Дерево функций; первый уровень – идентификация ситуации; второй уровень – оперативный контроль; третий уровень – генерация и принятие решений

3. Стратегии контроля эволюционной динамики аварийного судна

Планирование стратегий управления эволюционной динамикой аварийной ситуацией беспилотного судна в ЦДУ выполняется на основе генерации множества возможных состояний – элементов активной динамической системы (АДС) [6], отображающей параметры взаимодействия, необходимые для эффективной оценки безопасности судна в экстремальной ситуации. Формальный аппарат оценки функционального состояния и прогнозирования поведения беспилотного судна в аварийной ситуации реализуется с помощью модели «сущность – связь» (ER-модель). При реализации этой модели использованы приведенные ниже определения информационной сложности при формализации проблемы распознавания и контроля текущих ситуаций

Определение 1. Информационная сложность $Inf(Cat)$ пространственно-временного поля динамической модели катастроф при контроле динамической непотопляемости определяется логическим пересечением компонентов информационного вектора, формирующего образы $F(G)$, адекватно отображающие состояние системы «аварийное судно – внешняя среда» $S(W)$ в процессе ее эволюции:

$$Inf(Cat) = \langle F(G) \cap S(W) \rangle, \quad (3)$$

Определение 2. Распознавание состояний аварийного судна в режиме динамических измерений в конкретный момент времени осуществляется на основе количественно измеренных признаков текущей ситуации в зависимости от состояния беспилотного аварийного судна и уровня действующих возмущений:

$$P_k = \{P_{jk}\} = p_{1k}, \dots, p_{jk}, (j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K) \quad (4)$$

Определение 3. Многомерный вектор $\mu_{jk} \forall_{jk}$ образует информационное пространство идентификационных признаков, каждому из которых ставится в соответствие мера его информативности

$$P_{jk} \rightarrow \mu_{jk}, (j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K) \quad (5)$$

При интерпретации решений в задаче адаптивной идентификации, аппроксимации и прогноза на основе принципа конкуренции могут быть использованы различные модели. Наиболее простая модель связана с построением и анализом модели выбора. *Модель выбора* [3] позволяет осуществлять целевое сужение множества альтернатив при выборе и обосновании лучшего решения на основании принципа конкуренции:

$$\Phi(Q) = \{q_i \in Q | U\}, \quad (6)$$

где q_i – объект конкуренции из множества Q , выбранный по условию U .

Общий подход к интерпретации решений на основе функции выбора и парадигмы [3] реализуется с использованием принципа сложности [7], в рамках которого рассматриваются описания ветроволновых режимов и динамики взаимодействия. Формальная модель функции выбора построена с использованием метода MDL [2]. Конкретизация этого метода приводит к следующей модели выбора:

$$\pi(R, MDL) = \langle R(M), T(C_R) \rangle, \quad (7)$$

где $\pi(R, MDL)$ – структура, определяющая проблему выбора в задачах идентификации, аппроксимации и прогноза; $R(M)$ – отношение, определяющее структуру альтернативных моделей, описывающих рассматриваемую задачу в рамках парадигмы [2] и теории сложности [7]; $T(C_R)$ – тип выбора, реализуемый на основе критериальной функции, формируемой в зависимости от решаемой задачи контроля динамики аварийного судна на волнении:

$$T(C_R) = \langle \Phi(I), \Phi(A), \Phi(F) \rangle, \quad (8)$$

где $\Phi(I)$, $\Phi(A)$, $\Phi(F)$ – функция выбора решения при контроле текущих ситуаций динамики аварийного судна на волнении, причем $\Phi(I)$ реализует выбор решения при идентификации текущей ситуации, связанной с оценкой внешнего возмущения и динамики судна, $\Phi(A)$ – выбор решения в задачах аппроксимации (оценка равновесных параметров посадки и динамических характеристик аварийного судна), а $\Phi(F)$ – адаптивный прогноз при контроле эволюции системы «аварийное судно – внешняя среда» в соответствии с концептуальной моделью СТК [], адаптируемой применительно к рассматриваемой проблеме.

4. Абстрактный образ нестационарной динамики аварийного судна

Стратегия построения абстрактного образа (АО) аварийных ситуаций при интерпретации динамической непотопляемости состоит в установлении момента перехода T из одного состояния в другое под воздействием управления U^* и возмущения W^* [7]:

$$U^* : T \rightarrow U, \quad W^* : T \rightarrow W, \quad (9)$$

Определение АО «скачка» состояний определяется как момент перехода аварийного судна в критическую область. Выделяя определяющий параметр $X(t)$, можно представить АО «скачка» в виде

$$X(t) \rightarrow \max, t^* \in [t_1, t_N], \quad (10)$$

где момент t^* устанавливается с использованием чисел Фибоначчи [5] и на основе НФС [4].

Эволюционная стратегия построения АО аварийной ситуации (рис.3) реализуется на основе стандартного ЦДУ [8] и критериальной базы НФС. Адаптивный прогноз эволюции АО строится на основе анализа результатов моделирования динамики взаимодействия, а также с использованием априорной информации о процессах-прецедентах, накопленной по данным аварийной статистики.

Формальная модель АО интеллектуального решателя $Int(S)$, обеспечивающего функционирование НФС при прогнозе аварийных ситуаций, представляется в виде [4]:

$$Int(S) = \{U(Unt), A(M), KB\}, \quad (11)$$

где $U(Int)$ – множество допустимых управлений (уровней ИП); $A(M)$ – ансамбль методов диагностики состояний и прогноза развития ситуаций; KB – динамическая база знаний НФС.

Процесс управления АО в режиме УС состоит в установлении гармонии и гомеостаза в виде кортежа:

$$\langle T, S, U(t), W(t), X, Y \rangle, \quad (12)$$

где T – дискретные моменты времени эволюции АО на интервале $[t_0, t_k]$; S – состояния объектов НФС; $U(t)$ и $W(t)$ – управляющие и возмущающие воздействия; X и Y – входы и выходы системы.

Реализация функции управления в нестационарной среде динамической непотопляемости на основе АО предполагает использование вектора параметров $X \in R^n$, определяющих поведение аварийного судна и вектора состояния нестационарной среды взаимодействия $W \in R^m$ в заданном режиме.



Рис. 3. Оперативный контроль динамики аварийного судна на основе ЦДУ

Генерация альтернатив позволяет сформировать обобщенный сценарий развития аварийной ситуации при формировании стратегии АО в нестационарной динамической среде. Используя понятия теории принятия решений, можно идентифицировать следующие типы переменных:

$$\langle Str(P), Out(P), E(P) \rangle, \quad (13)$$

где $Str(P)$ – стратегии планирования; $Out(P)$ – исходы, которые можно осуществить при интерпретации ситуации на основе АО; $E(P)$ – эффективность, которая выражает соотношения между стратегиями планирования и исходами.

Оценка адекватности моделей АО представляется отображением на множестве допустимых решений. Функция интерпретации отображения $Q(m)$ позволяет реализовать процедуру сравнения вариантов решения $m \in M$ с данными физического моделирования $Ph(M)$ [7]:

$$Q(m) = \min Q(m) \in Ph(M), m \in M. \quad (14)$$

Оптимизационная задача построения АО содержит пространство решений M , ограничения D в допустимой области M с критерием оптимальности Q :

$$M \subseteq D, Q: M \rightarrow R. \quad (15)$$

Максимальное соответствие ситуации действительности (адекватность) в момент времени t :

$$\{X(t)Y(t) \rightarrow \min\}, u \in [t_1, t_2], \quad (16)$$

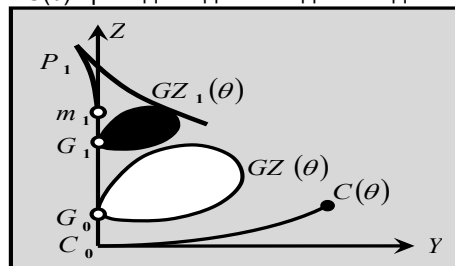
где $u([t_1, t_2])$ — управление на отрезке времени.

5. Модели катастроф при интерпретации динамики аварийного судна

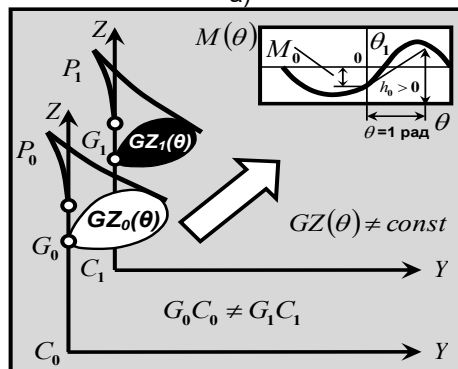
Интерпретация типичных случаев затопления в рамках динамической модели СТК [3] представлена

на рис. 4 в виде геометрических образов, определяющих множества $B(\theta)$, $GZ(\theta)$, $C(\theta)$ в виде интерпретируемых структур в системе МПК.

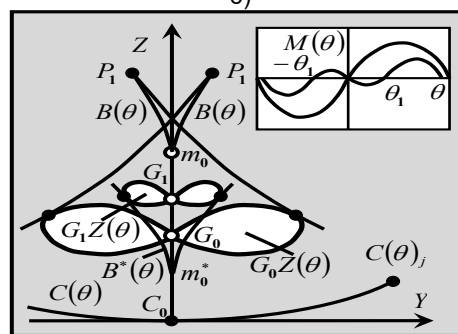
Светлым овалом обозначены исходные состояния множества $GZ_0(\theta)$, а темными – множества $GZ_1(\theta)$, установленные при стабилизации затопления в результате проведенных мероприятий по сохранению живучести судна. Для простоты интерпретации на этих графиках приведены только геометрические образы положительных участков кривых $GZ_1(\theta)$. Вверху в светлой рамке рис.4б,в указана аварийная диаграмма остойчивости $M(\theta)$, соответствующая указанным случаям затопления. Кривая $C(\theta)$ приведена для исходной модели.



а)



б)



в)

Рис. 4. Случаи затопления на основе динамической модели СТК: а и б – симметричное и асимметричное затопления при положительной метацентрической высоте; в – симметричное затопление при отрицательной метацентрической высоте

При практической реализации моделей динамики аварийного судна предпочтение всегда отдается математическому описанию, построенному на базе данных динамических измерений как наиболее эффективному средству получения априорной информации о гидродинамическом взаимодействии. Если в процессе контроля динамики аварийного судна возникнет нештатная ситуация, то она рассматривается как новая задача и

при ее интерпретации определяется класс принадлежности, либо формируется новый класс на основе адаптивной системы, использующей принцип адаптивного резонанса [4].

6. Экран оператора ИС в пульте ЦДУ

Важнейшей задачей разработки программного комплекса ЦДУ является осуществление быстрого и гибкого динамического взаимодействия оператора с программной системой. Для решения этой задачи может быть использован механизм разбиения задачи на подзадачи. Пульт дистанционного управления нестационарной динамикой беспилотных судов в аварийной ситуации (рис.5а) дополняется экраном оператора на основе представления, используемого в бортовой ИС «Непотопляемость» (рис.5б) [4].



а)



б)

Рис. 5. Экран оператора программного комплекса оценки поведения беспилотного судна в аварийной ситуации: а – стандартная модель ЦДУ [8], принятая в зарубежной практике; б – модель в бортовой ИС [4]

Парадокс беспилотного управления состоит в том, что исключается роль «человеческого фактора» на аварийном беспилотном судне, однако значительно возрастает роль этого фактора при управлении ЦДУ как многорежимным комплексом. В этих условиях на каждом шаге принятия решений при контроле динамической непотопляемости

производится оценка риска. Реализация системы генерации сценариев оценки рисков ведется в рамках технологии открытых систем. База знаний таких систем определяет содержательные формулировки сценариев, которым сопоставляются числовые интерпретации рисков.

Таким образом, *актуальность* разработки системы контроля динамической непотопляемости беспилотных судов определяется концептуальными решениями создания модели управления как формализованного ядра ЦДУ, интегрирующего интеллектуальные технологии и высокопроизводительные вычисления в режиме УС. Основанием для создания структуры ЦДУ является стратегия беспилотного управления, определяющая необходимые вычислительные ресурсы обеспечения динамической непотопляемости, а основным направлением реализации компьютерных технологий – их интеллектуализация.

Выработка *стратегических решений* при функционировании ЦДУ позволяет формализовать сложные задачи моделирования и интерпретации динамической непотопляемости в трудноформализуемых средах. При наличии на борту беспилотного судна ИС «Непотопляемость» стратегия интерпретации аварийных ситуаций предусматривает разделение функций управления: текущий контроль непотопляемости на уровне ИС обеспечивается для стандартных ситуаций, реализуемых в базе знаний НФС, а оперативный контроль мореходности в нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуациях реализуется в ЦДУ на основе адаптивных алгоритмов и системы виртуального моделирования МПК.

Заключение

Разработанные концептуальные решения и методы интерпретации нестационарной динамики аварийного беспилотного судна и теоретических принципов и механизмов обработки информации реализованы в ЦДУ на основе ИТ и высокопроизводительных вычислений. Механизм этого феномена реализуется в рамках эволюционной парадигмы СТК при формировании потенциальных свойств интерпретирующих и управляющих моделей эволюционирующего АО текущей ситуации. Ядром вычислительной технологии контроля динамики аварийного судна является МПК, функционирующий в режиме УС на основе НФС. В результате открываются перспективы построения алгоритмов и программного обеспечения прикладных задач обработки сложных систем знаний в различных областях практических приложений.

Литература

1. Андреев С.В., Шкодырев В.П. Интеллектуальный WEB-сервер управления дистанционным экспериментом // Труды международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2001. Санкт-Петербург. 2001. Т.1, с. 274-277.
2. Колмогоров А.Н. Избранные труды в 6-ти томах. М.: Наука, 2005. 304 с.
3. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
4. Нечаев Ю. И., Петров О. Н. Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф: монография. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. 368 с.
5. Нечаев Ю.И. Интеллектуальные технологии в системе исследовательского проектирования. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. 320 с.
6. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНЕГ, 1999. 104 с.
7. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. М.: Наука, 1990.

341 с.

8. Nikitakas N. Fourth Industrial Revolution. University of the Aegean. 7 Oct 2019.
9. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

References

1. Andreev S.V., Shkodyrev V.P. Intellektual'nyy WEB-server upravleniya distantsionnym eksperimentom [Intellectual WEB-server for remote experiment control]. Works of international conference on soft computing and measurement (SCM 2001). Saint-Petersburg, LETI Publ., 2001, V. 1, p.p. 274-277.
2. Kolmogorov A.N. Isbrannye trudy v 6 tomakh [The selected works in 6 volumes]. M., Science Publ., 2005. 304 p.
3. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2011.
4. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotoplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2014.
5. Nechaev Yu.I. Intellektual'nye tekhnologii v sisteme issledovatel'skogo proektirovaniya [Intellectual technologies in research design system]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2017.
6. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs teorii aktivnykh sistem [Course of the theory of active systems]. M: SINEG Publ., 1999. 104 p.
7. Solodovnikov V.V., Tumarkin V. I. Teoriya slozhnosti i proektirovanie upravlyauschich system [The theory of complexity and designing of control systems]. M: Science Publ., 1990. 341 p.
8. Nikitakas N. Fourth Industrial Revolution. University of the Aegean. 7 Oct 2019.
9. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. URL: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Иванович Нечаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Yuri I. Nechaev, Dr. Sci. (Eng), professor, professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: nechaev@mail.ifmo.ru

Олег Николаевич Петров, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: petr_oleg@mail.ru

Oleg N. Petrov, Ph. D. (Eng), associate professor, associate professor of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: petr_oleg@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.052
УДК 004.023:004.891.2:004.855.5

Анализ навигационной аварии с использованием аппарата современной теории катастроф

И.А. Янчин¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Аннотация. В работе рассматривается метод оценки маршрута судна с точки зрения безопасности и оптимальности. Оценка выполняется за счёт вычисления характеристических коэффициентов, которые описывают свойства маршрута, важные для оценки этих качеств. Также в работе даётся описание метода прогнозирования дальнейшего маршрута судна на основе предписанного маршрута рейса и информации о существующем отклонении фактического маршрута от предписанного. На основе прогнозирования дальнейшего маршрута, и с использованием характеристических коэффициентов, становится возможным анализ долгосрочного влияния отклонения фактического маршрута от предписанного. Маршрут рассматривается как динамическая характеристика судна, эволюционирующая с течением времени. Обсуждаются особенности развития маршрута судна при стремлении к стабильному либо катастрофическому состоянию с позиций современной теории катастроф. Геометрическая интерпретация эволюционной динамики предусматривает использование когнитивных образов. В работе приводится анализ произошедшей аварии круизного судна Costa Concordia с использованием предложенного метода с целью исследования влияния изменения маршрута на безопасность рейса. Выполняется сравнение предписанного маршрута с фактическим. **Ключевые слова:** навигационные аварии, навигация, оценка безопасности, сравнение маршрутов, прогнозирование маршрута.

Navigational accident analysis using the modern catastrophe theory

Ivan A. Yanchin¹

¹St. Petersburg state marine technical University, Russian Federation

Abstract. The paper presents a method to analyze a ship's route in terms of safety and optimality. The route is examined using the characteristic coefficients that represent route's properties essential for assessment of these aspects. The paper also presents a method to estimate the future route based on the prescribed route and the existing discrepancy between the actual route and the prescribed one. With such estimation technique and using the characteristic coefficients it is possible to determine the long-term effects of the discrepancy. The route is considered as a dynamic characteristic of the ship, evolving over time. Peculiarities of the development of the ship's route when striving for a stable or catastrophic state from the standpoint of the modern catastrophe theory are discussed. A geometric interpretation of evolutionary dynamics involves the use of cognitive images. As an example, the paper provides analysis of the Costa Concordia's accident using the described method in order to determine the effects of the route discrepancy. A comparison is made of the prescribed route with the actual one that the crew planned to move. **Key words:** navigational accidents, navigation, safety estimation, route comparison, route prediction.

Введение

В условиях большой экономической важности грузоперевозок водными путями, большое значение приобретает вопрос об использовании оптимальных маршрутов при выполнении рейсов. Использование систем построения маршрута движения судна, учитывающих погодные условия, позволяет снизить экономические издержки на транспортировку грузов, и даже сократить протяжённость рейса с точки зрения времени, так как судно имеет возможность двигаться, избегая областей сильного волнения, что вынудило бы снизить скорость [5].

Большую роль играют ошибки экипажа при навигации как причины аварий. Восстановление судна, повреждённого в результате аварии, или даже его гибель, приводят к существенным экономическим издержкам судовладельца, и минимизация возможности возникновения таких аварий в процессе движения судна, позволит снизить эти издержки. Несмотря на развитие навигационных технологий, число морских инцидентов за последние годы выросло почти в 1,5 раза [4]. Кроме того, до 58% всех инцидентов вызваны влиянием человеческого фактора, а навигационные ошибки вызывали до половины всех зарегистрированных инцидентов [4].

Таким образом, важной становится возможность оценки оптимальности и безопасности маршрута для предотвращения аварий и сокращения издержек, причём оценка должно проводиться не только в момент поиска маршрута, но и в момент рейса, так как возможно отклонение судна от маршрута во время рейса.

1. Характеристические коэффициенты маршрута

Маршрут должен оцениваться исходя из двух базовых критериев: безопасности и оптимальности. Критерии являются численным выражением меры соответствия маршрута предъявленным требованиям.

1.1. Оценка безопасности маршрута

Под безопасным маршрутом понимается такой, при движении по которому судну не грозит столкновение с каким-либо препятствием. Таким образом, критерий безопасности маршрута может быть выражен как величина, обратная вероятности того, что в процессе движения судна по маршруту произойдёт столкновение с препятствием, то есть

$$S(r) = 1 - P_r(\text{collide}), \quad 0 \leq S(r) \leq 1$$

где $P_r(\text{collide})$ – вероятность столкновения с препятствием в процессе движения по маршруту r .

Величина $S(r)$ представляет коэффициент навигационной безопасности. В случае необходимости, определение критерия безопасности может быть расширено и коэффициент навигационной безопасности может быть одним из его компонентов.

1.2. Оценка оптимальности маршрута

Под оптимальным маршрутом понимается маршрут с наименьшей протяжённостью, движение по которому занимает меньше времени по сравнению с остальными маршрутами, соединяющими точку начала движения и точку назначения. Также известно, что количество путевых точек маршрута, приводящих к необходимости выполнения манёвров по изменению направления движения, оказывает влияние на оптимальность маршрута, и преследование цели по его оптимизации означает и необходимость минимизации количества таких точек [6].

Таким образом, критерий оптимальности может быть выражен через коэффициенты протяжённости, времени, и простоты.

Кратчайшим маршрутом, соединяющим две точки, является образованный ими отрезок прямой, проходящей через них. Отсюда следует, что чем сильнее маршрут приближается к такому отрезку, тем лучше. Мера приближения маршрута к кратчайшему является значением коэффициента протяжённости, то есть

$$D(r) = \frac{l_e}{l_r}, \quad 0 \leq D(r) \leq 1$$

где l_e – длина эталонного, кратчайшего маршрута, а l_r – длина оцениваемого маршрута r .

Так как кратчайший маршрут не всегда возможен, а скорость движения судна на некотором участке может быть ограничена, то коэффициент времени может быть выражен как мера приближения времени прохождения маршрута ко времени прохождения идеального, с точки зрения протяжённости маршрута, с максимальной доступной судну скоростью, то есть

$$T(r) = \frac{t_e}{t_r}$$

где t_y – время прохождения идеального маршрута с максимальной скоростью судна в стоячей воде, а t_r – время прохождения рассматриваемого маршрута r . С учётом того, что в случае наличия попутных течений судно может двигаться со скоростью большей, чем максимальная скорость в стоячей воде, то $T(r) \geq 0$.

В идеальном случае, в маршрут входят только две точки: точка начала движения и точка назначения [6]. Отсюда следует, что коэффициент простоты маршрута выражает меру его приближения к идеальному с точки зрения количества промежуточных точек, то есть

$$C(r) = \frac{2}{p_r}, \quad 0 \leq C(r) \leq 1$$

где p_r – количество промежуточных точек в маршруте r .

В общем случае, определение оценки оптимальности маршрута также может быть расширено за счёт введения дополнительных коэффициентов, например, такого, который оценивает расход топлива во время рейса.

2. Прогнозирование дальнейшего маршрута движения

В процессе движения судно может отклониться от предписанного маршрута, в этом случае необходимо определить, в какой мере это отклонение сказывается на характеристиках фактического маршрута судна. Этот анализ позволяет сделать вывод о том, остаются ли характеристики маршрута в допустимых рамках, или в результате отклонения был получен маршрут, нарушающий наложенные ограничения [2].

Следует отметить, что оцениваться может не только весь маршрут, но и его фрагмент. В этом случае точке начала движения соответствует точка начала фрагмента, а точке назначения – точка конца фрагмента.

Рассмотрим некоторый маршрут, соединяющий точку начала движения A и точку назначения B , рисунок 1. Во время планирования маршрута, для него были вычислены характеристические коэффициенты описанным выше способом.

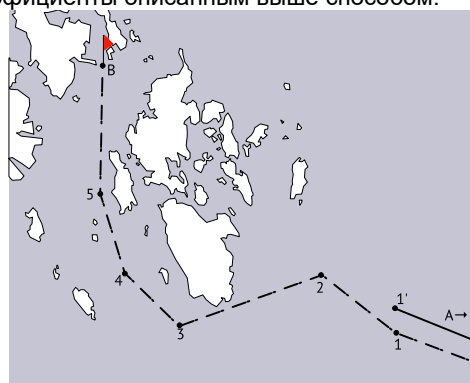


Рис. 1. Пример ситуации, в которой судно отклоняется от намеченного маршрута. Пунктиром обозначен предписанный маршрут, сплошной линией – фактический.

В процессе движения судна по маршруту, оно последовательно посещает все промежуточные точки. По прибытии в очередную точку, снова вычисляются характеристические коэффициенты, при этом маршрут, для которого эти коэффициенты вычисляются, состоит из двух частей: первая это фактический путь, пройденный судном к текущему моменту, а вторая – прогнозируемый маршрут от текущей промежуточной точки до точки назначения. Как видно из рисунка 1, при движении к точке 1 судно отклонилось от предписанного маршрута. Как следствие, по прибытии в точку 1', должно быть выполнено прогнозирование дальнейшего маршрута, и для него должны быть вычислены характеристические коэффициенты.

Отклонение судна от предписанного маршрута может не оказывать влияния на безопасность и оптимальность фактического маршрута сразу, как только отклонение произошло. Для определения

долгосрочных последствий отклонения и анализа их влияния на безопасность и оптимальность маршрута может быть использовано прогнозирование дальнейшего маршрута судна.

Для маршрута известно расположение всех его промежуточных точек, а также маневров, которые необходимо выполнить, чтобы, находясь в некоторой точке, попасть в следующую. Чтобы определить, как отклонение от маршрута сказывается в долгосрочной перспективе, необходимо вычислить расположение его промежуточных точек с учётом уже произошедшего отклонения. Возвращаясь к ситуации, представленной на рисунке 1, чтобы определить расположение точки 2' следует вычислить результат манёвра, предписанного для промежуточной точки 1, как если бы он был выполнен в точке 1'. То есть, вычисление расположения точки 2' выполняется за счёт применения манёвра, ожидаемого для точки предписанного маршрута, но для фактического расположения этой точки. Результат вычисления расположения точки 2' представлен на рисунке 2.

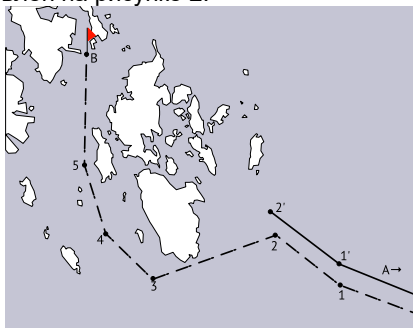


Рис. 2. Маршрут судна с прогнозируемым дальнейшим отклонением.

Определив ожидаемое расположение промежуточной точки 2', можно определить ожидаемое расположение точки 3', для чего следует применить манёвр, предписанный для точки 2 к точке 2'. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет определено ожидаемое расположение точки назначения B', или пока не будет получен такой прогнозируемый маршрут, который приводит к нарушению ограничений. На рисунке 3 приведено ожидаемое расположение точки 3'. Как видно из рисунка, при попытке пройти по ребру (2', 3') произойдёт столкновение с препятствием. Следовательно, должна быть выполнена процедура поиска маршрута, начиная с его текущего расположения.

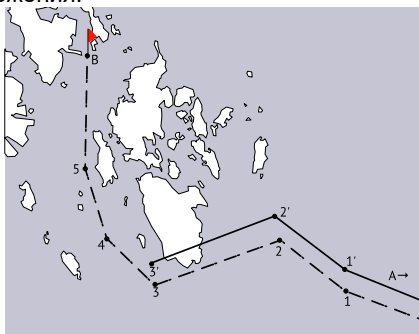


Рис. 3. Дальнейшее прогнозирование маршрута, возможна аварийная ситуация.

Метод прогнозирования маршрута основан на предположении, что, отклонившись от предписанного маршрута, судно будет сохранять это отклонение, то есть экипаж не будет предпринимать каких-либо действий ни для возврата на предписанный маршрут ни для увеличения степени отклонения. В реальности такая ситуация маловероятна. Вероятнее, что судно будет менять степень отклонения от предписанного маршрута в процессе движения. То есть, описанный метод может быть использован для краткосрочного прогнозирования, результаты для которого уточняются по прибытию в очередную промежуточную точку.

Таким образом, маршрут можно рассматривать как динамический объект, изменяющийся с течением времени, чьи изменения могут быть выражены через изменение значений характеристических коэффициентов.

3. Анализ произошедшей аварии

Анализ динамики фактического маршрута может быть использован для оценки влияния его отклонения от предписанного маршрута на безопасность и оптимальность, с учётом постоянного изменения меры отклонения.

Если динамика изменения указывает на постоянное ухудшение свойств маршрута, то это говорит о том, что, в конечном счёте, ограничения могут быть нарушены, то есть, динамика изменения маршрута судна движется к аттрактору «аварийная ситуация» [1]. В этом случае требуется построить новый маршрут. Стабилизация динамики маршрута в окрестности некоторых значений характеристических коэффициентов, не указывающих на нарушение ограничений, говорит о том, что отклонение не ухудшает свойств маршрута в значительной мере, а динамика изменения маршрута движется к аттрактору «получение безопасного и оптимального маршрута» [1].

Рассмотрим анализ динамики маршрута судна на примере аварии круизного судна Costa Concordia, произошедшей 13 января 2012 года. На рисунке 4 показано сравнение маршрутов судна 6 января 2012 года, пройденного успешно, и 13 января того же года, приведшего к крушению.



Рис. 4. Авария круизного судна Costa Concordia. Сплошной линией показан маршрут, которым судно двигалось 6 января, пунктирной – маршрут 13 января, в цвете – возможный путь возврата на предписанный маршрут.

Согласно результатам официального расследования, причиной произошедшего стало отклонение от изначально намеченного маршрута, приведшее к опасному сближению с береговой

линией, и ошибки, допущенные при планировании нового маршрута [7]. Само отклонение являлось результатом решения капитана, то есть первоначальной причиной является человеческий фактор.

Для анализа маршрута судна требуется знать расположение его промежуточных точек, но так как для маршрутов 6 и 13 января это неизвестно, точки были расставлены вручную, в местах изменения направления движения (рисунок 4).

Сравним маршрут 6 января с маршрутом 13 января. Из материалов расследования известно, что капитан судна, отклонившись от первоначального маршрута, планировал вернуться на него, чтобы продолжить рейс [7]. На рисунке 4 показан возможный путь, которым судно могло бы вернуться на предписанный маршрут, если бы аварии не произошло.

С целью сравнения маршрутов, вычислим характеристические коэффициенты для предписанного маршрута (маршрута 6 января) и для фактического (маршрута 13 января), с достроенным окончанием. В данном случае целью является не столько оценка самих маршрутов, сколько сравнение их между собой, то есть значимой является разница между значениями коэффициентов, а не сами значения.

Основную сложность при расчёте коэффициентов представляет расчёт коэффициента безопасности, так как он представляет вероятность столкновения с препятствием. Предписанный маршрут, исходя из схемы на рисунке 4, не предполагает столкновения с препятствием, так как пролегает вдали от береговых линий. Таким образом, можно считать, что для предписанного маршрута коэффициент безопасности $S = 1$, то есть судно не рискует столкновением. В случае фактического маршрута известно, что ранее Costa Concordia уже отклонялась от предписанного маршрута в этой географической области и подходило к острову на опасное расстояние [3], однако в тот раз аварии не произошло. Из известных случаев приближения к острову следует, что вероятность крушения близка к 0,5, из чего можно сделать вывод, что коэффициент безопасности фактического маршрута имеет значение $S = 0,5$.

В таблице 1 представлено сравнение значений характеристических коэффициентов маршрутов 6 и 13 января 2012 года.

Таблица 1
Сравнение характеристических коэффициентов маршрутов 6 и 13 января 2012.

Коэффициент	Маршрут 6 января	Маршрут 13 января	Разница
S	1,0	0,5	0,5
D	0,9886	0,8667	0,1219
T	0,7879	0,6908	0,0971
C	0,5	0,1818	0,3182

Из таблицы 1 видно, что все коэффициенты фактического маршрута имеют меньшее значение, чем соответствующие коэффициенты предписанного маршрута. Это говорит о том, что фактический маршрут хуже предписанного.

Установлено, что использование визуальных образов для представления состояния динамического объекта существенно упрощает его интерпретацию оператором бортовой управляющей системы [1]. Использование когнитивных образов для представления состояния динамического объекта – один из инструментов современной теории катастроф, упрощающий интерпретацию ситуации оператором в условиях экстремальной ситуации. На рисунке 5 представлены когнитивные образы маршрутов 6 января и 13 января, совмещённые для наглядности. Как видно, образы существенно различаются по форме и размеру, что отражает различие между маршрутами.

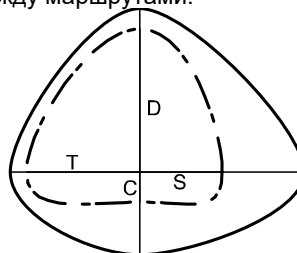


Рис. 5. Сравнение когнитивных образов маршрута 6 января (сплошная линия) и 13 января (пунктирная линия).

С другой стороны, если бы отклонение было случайными, экипаж мог принять решение вернуться на первоначальный маршрут в любой момент. В этом случае, возможно существование нескольких вариантов пути, возвращающего судно на первоначальный маршрут, в зависимости от того, в какой момент было бы принято решение.

Это является частным случаем прогнозирования маршрута, так как исследуется несколько предполагаемых путей возврата, и то, какой из них будет выбран зависит от времени, когда будет принято решение вернуться на предписанный маршрут. Это приводит к изменению возможного фактического маршрута с течением времени и возникновению эволюционной динамики этого маршрута. На рисунке 6, представлены возможные маршруты, из каждой промежуточной точки фактического маршрута, которыми могло бы двигаться судно, чтобы вернуться на первоначальный маршрут.

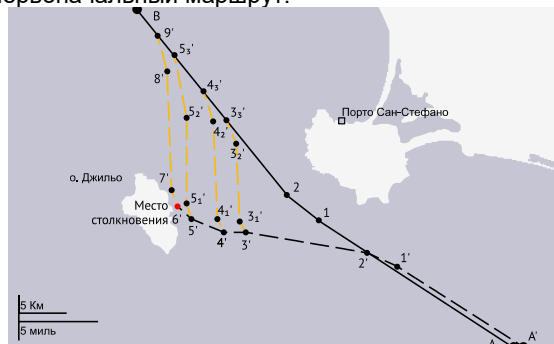


Рис. 6. Потенциальные пути возврата на предписанный маршрут в зависимости от пройденного пути. Сплошной линией показан предписанный маршрут, пунктиром – фактический, пунктиром в цвете – достроенные возможные пути возврата.

Оценим возможные маршруты возвращения. Вычислим характеристические коэффициенты для маршрутов от точки А' до В, с учётом того, что судно может вернуться на первоначальный маршрут от точек 3', 4', 5' или 6', таблица 2.

Таблица 2
Характеристические коэффициенты маршрута в зависимости от выбранной точки возврата.

Маршрут	Коэффициент			
	S	D	T	C
Предписанный маршрут	1,0	0,9886	0,7879	0,5
От точки 3'	0,875	0,9037	0,7202	0,25
От точки 4'	0,75	0,8829	0,7036	0,2222
От точки 5'	0,625	0,8672	0,6912	0,2
От точки 6'	0,5	0,8667	0,6908	0,1818

Из таблицы видно, как изменяются значения характеристических коэффициентов маршрута с приближением судна к точке крушения (точке 6'). Можно видеть, что чем сильнее разница между предписанным маршрутом и фактическим, тем сильнее снижаются значения характеристических коэффициентов последнего, пока не достигнут наименьших значений для маршрута, проходящего через точку крушения. Это говорит об ухудшении параметров маршрута в процессе его изменения с течением времени, то есть о стремлении эволюции маршрута в сторону аттрактора, описывающего аварийную ситуацию [1].

На рисунке 7 приведён график изменения совокупного «качества» маршрута, вычисленного как сумма значений коэффициентов, при движении по фактическому маршруту. На этом рисунке измерение 1 соответствует предписанному маршруту (маршруту 6 января), измерение 2 – маршруту возвращения на предписанный маршрут из точки 3', измерение 3 – из точки 4', измерение 4 – точки 5', а измерение 5 – маршруту, проходящему через точку крушения (точку 6').

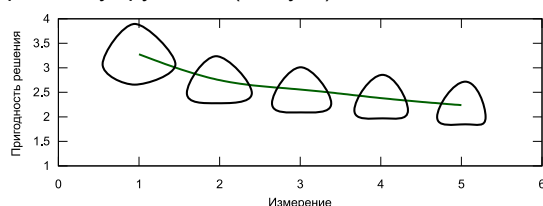


Рис. 7. Изменение пригодности маршрута 13 января в зависимости от прохождения фактического маршрута.

Таким образом, предлагаемый в настоящем исследовании метод прогнозирования и анализа изменения маршрута судна в процессе движения позволяет сравнивать маршруты между собой. В результате, становится возможным анализ изменения маршрута вследствие решения экипажа, в том числе в случае изменения маршрута во время движения судна.

Следует учесть, что вычисление коэффициентов маршрутов в настоящей работе базировалось на ряде предположений и упрощений, из-за чего возможны неточности, в частности, не учтены локальные течения, которые могли бы повлиять на движение судна. Однако даже в этом случае видно, как отличаются характеристические коэффициенты предписанного маршрута (маршрута 6 января) от фактического (маршрута 13 января).

Заключение

В работе дано описание характеристических коэффициентов, которые могут быть использованы для оценки свойств маршрута, и метода прогнозирования долгосрочного влияния отклонения фактического маршрута от предписанного на безопасность рейса и оптимальность его маршрута.

На основе прогнозирования маршрута и характеристических коэффициентов проводится анализ аварии судна Costa Concordia, выполняется сравнение предписанного маршрута для этого рейса с фактическим, которым экипаж планировал двигаться и проводится анализ нарастающего различия между маршрутами при приближении к точке аварии. Становится видно, что фактический маршрут существенно отличается от предписанного по всем характеристикам. При анализе постепенных изменений маршрута видно, что характеристические коэффициенты уменьшаются, демонстрируя постепенное ухудшение фактического маршрута по сравнению с предписанным.

Таким образом, предлагаемый метод оценки и сравнения маршрутов демонстрирует свою работоспособность, что позволяет сделать вывод о применимости предлагаемого в настоящем исследовании метода анализа и прогноза маршрута судна к анализу произошедших навигационных аварий с целью исследования развития аварийной ситуации во времени и обнаружения тех этапов её развития, когда аварийная ситуация ещё могла быть предотвращена.

Так как характеристические коэффициенты могут быть использованы для сравнения нескольких маршрутов между собой, становится возможным использовать целевую функцию на их основе при поиске маршрута методами оптимизации, предусматривающими сравнение решений-кандидатов.

Литература

1. Нечаев Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений : монография. СПб: Арт-Экспресс, 2011.
2. Янчин И. А., Петров О. Н. Эволюционная динамика маршрута судна на основе современной теории катастроф // Сборник докладов «XXII Международной конференции по мягким вычислениям и изменениям». – 2019.
3. BBC. Costa Concordia: What happened [Электронный ресурс] / BBC. URL: <https://www.bbc.com/news/world-europe-16563562> (дата обращения: 10.11.2019).

4. European Maritime Safety Agency. Annual overview of marine casualties and incidents 2018 / European Maritime Safety Agency, 2018.
5. Grifoll M., Martinez de Osés F. X., Castells M. Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping // WMU Journal of Maritime Affairs. – 2018. – Vol. 17, № 2. – P. 195-211.
6. Multi-criteria route planning with risk contour map for smart navigation / Min-Gi Jeong et al. // Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 172. – P. 72 - 85.
7. Ministry of infrastructures and transports. Marine Casualties Investigative Body. Cruise Ship. Costa Concordia. Marine casualty on January 13, 2012. Report on the safety technical investigation. – Ministry of infrastructures and transports, 2013.

References

1. Nechaev YU. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podhod pri prinyatii reshenij [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making] : monografiya. Art-Ekspress, 2011.
2. Yanchin I. A., Petrov O. N. Evolyucionnaya dinamika marshruta sudna na osnove sovremennoj teorii katastrof [Evolutionary dynamics of ship route using the modern catastrophe theory]. Sbornik dokladov «XXII Mezhdunarodnoj kon-ferencii po myagkim vychisleniyam i izmeneniyam». 2019.
3. BBC. Costa Concordia: What happened. URL : <https://www.bbc.com/news/world-europe-16563562> (accessed : 10.11.2019).
4. European Maritime Safety Agency. Annual overview of marine casualties and incidents 2018 / European Maritime Safety Agency, 2018.
5. Grifoll M., Martinez de Osés F. X., Castells M. Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping. WMU Journal of Maritime Affairs. 2018. Vol. 17, # 2. P. 195-211.
6. Min-Gi Jeong et al. Multi-criteria route planning with risk contour map for smart navigation. Ocean Engineering. 2019. Vol. 172. P. 72 - 85.
7. Ministry of infrastructures and transports. Marine Casualties Investigative Body. Cruise Ship. Costa Concordia. Marine casualty on January 13, 2012. Report on the safety technical investigation. Ministry of infrastructures and transports, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иван Андреевич Янчин, аспирант кафедры вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: yanchin@pm.me

Ivan A. Yanchin, postgraduate student of the Department of computer science, St. Petersburg state marine technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation, e-mail: yanchin@pm.me



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 www.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) могут 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 www.morintex.ru из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по 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**